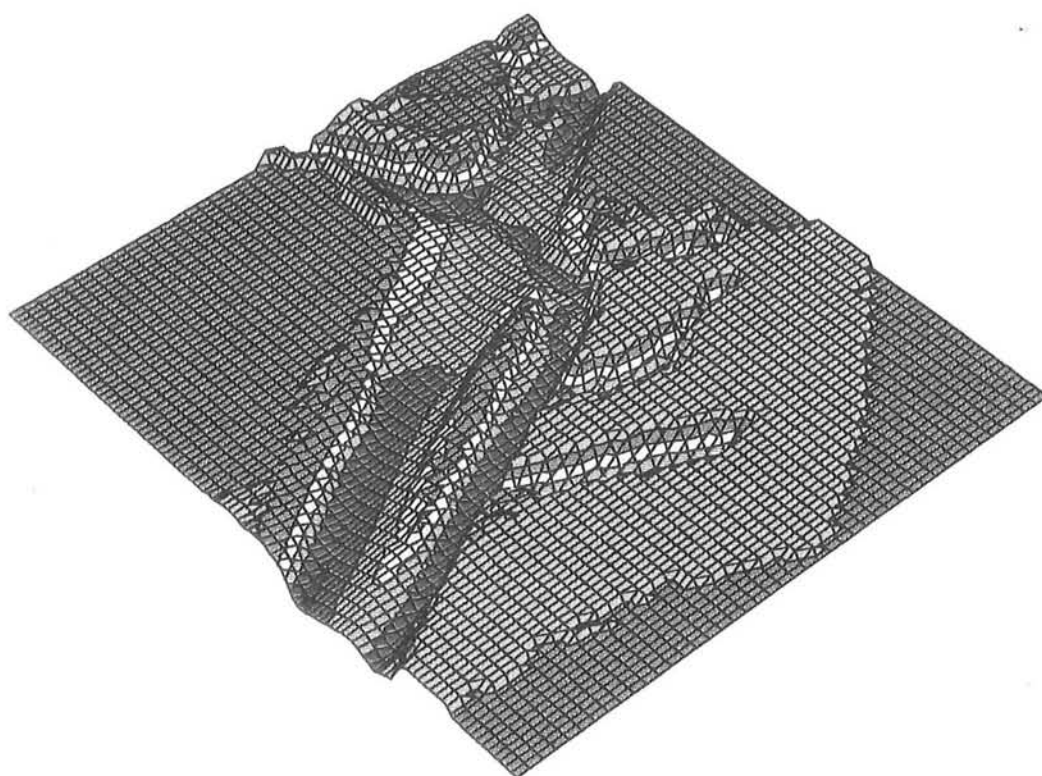


Zeevaartgeul Moerdijk

eindrapport



Maarten Jansen

april 1996

Afstudeerproject

Zeevaartgeul Moerdijk

Eindrapport

Maarten Jansen

april 1996

Afstudeercommissie:

prof.ir. K. d'Angremond, voorzitter

dr.ir. C. Kranenburg

ir. T. van der Meulen

ir. F. van Roode

drs. H. Verbeek

Voorwoord

Voor u ligt het eindrapport dat ik in het kader van mijn afstudeeronderzoek geschreven heb. Het onderwerp van het onderzoek is de verhoogde sedimentatie in de zeevaartgeul die vanaf de Dordtsche Kil naar het Industrie- en Havenschap Moerdijk over het Hollandsch Diep loopt.

Dit rapport is een verslag van mijn onderzoek bij Rijkswaterstaat, directie Zuid-Holland, waar ik me bezig heb gehouden met het berekenen van de ééndimensionale en tweedimensionale horizontale waterbeweging in het Hollandsch Diep en het berekenen van het sedimenttransport in het gebied als gevolg van deze waterbeweging.

Graag zou ik via deze weg mijn afstudeercommissie en de vele mensen bij Rijkswaterstaat bedanken voor hun steun tijdens dit onderzoek.

Ik hoop dat dit rapport en mijn onderzoek kan bijdragen bij het toekomstig onderzoek van de problemen in het gebied.

Maarten Jansen

Inhoudsopgave Eindrapport

Voorwoord	1
Inhoudsopgave Eindrapport	3
Inhoudsopgave Bijlagen	6
Summary en Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Historie en beschrijving van het gebied	13
2.1 Historie van het gebied	13
2.2 Geometrie van het gebied	14
2.3 Scheepvaartroutes	17
2.4 Industrie- en Havenschap Moerdijk (IHM)	18
2.5 Streefdieptes Zeevaartgeul	19
3 Probleemanalyse	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Probleemstelling	21
3.3 Doelstelling	21
3.4 Beperkingen	22
3.4.1 Uitgangspunten	22
3.4.2 Aannames	22
3.4.3 Randvoorwaarden	23
4 Water- en sedimentbeweging verleden, heden en toekomst	25
4.1 Situatie voor 1970	25
4.1.1 Waterbeweging voor 1970	25
4.1.2 Sedimentbeweging voor 1970	26
4.2 Situatie in de periode 1970-1995	26
4.2.1 Waterbeweging in de periode 1970-1995	26
4.2.2 Sedimentbeweging in de periode 1970-1995	27
4.3 MER- beheer Haringvlietsluizen / Toekomstige waterbeweging	29
5 Modelleren van de waterbeweging	33
5.1 Keuze modellering	33
5.1.1 Ééndimensionale modellering	34
5.1.1.1 ZWENDL	34
5.1.1.2 DELWAQ	35
5.1.1.3 RAMING	35
5.1.2 Tweedimensionale horizontale modellering	36
5.1.2.1 WAQUA	36
5.1.2.2 DELWAQ	36

5.2 Afweging en keuze	37
5.3 Randvoorwaarden ZWENDL	38
5.4 Uitvoer ZWENDL en koppeling met WAQUA	40
5.5 Uitvoer van WAQUA en koppeling met DELWAQ	41
6 Beschrijving van het gedrag van sediment	43
6.1 Beschrijving van sediment	43
6.1.1 Beschrijving slib	43
6.1.2 Beschrijving zand	44
6.2 Erosie van sediment	44
6.3 Transport van sediment	44
6.4 Sedimentatie/Depositie van sediment	45
6.5 Concentraties bij verschillende afvoeren	45
6.6 Kwaliteit sediment en lokaties van vervuilingen	48
6.6.1 Kwaliteitsklassen sediment	48
6.6.2 Lokatie van vervuilingen	49
6.7 Mogelijke behandelingen van vervuild gebaggerd sediment	50
7 Modelleren gedrag sediment	51
7.1 Aantal fracties in modellering	51
7.2 Toelichting fysische begin- en randvoorwaarden	52
7.2.1 Gebruikte Rijnafvoeren	52
7.2.2 Begin- en randvoorwaarden concentraties	52
7.2.3 Bodemsamenstelling	55
7.2.4 Dichtheid van het water	55
7.2.5 Windinvloeden	56
7.3 Parameters voor de discretisatie in ruimte en tijd	56
7.3.1 Modelleren van het gebied	56
7.3.2 Tijdstap en inspeeltijd	57
7.3.3 Dispersie	59
7.4 Fysische formulering van het gedrag van sediment	61
7.5 Parameters in modellering gedrag sediment	66
7.5.1 Inleiding	66
7.5.2 Criteria voor het bepalen van de parameters	66
7.5.3 Sedimentatieparameters	68
7.5.3.1 Kritische stroomsnelheden voor sedimentatie	68
7.5.3.2 Valsnelheden van de fracties	70
7.5.3 Erosieparameters	72
7.5.3.1 Kritische stroomsnelheid voor erosie	72
7.5.3.2 Erosieconstante M	74
7.5.4 Samenvatting en commentaar	75

8 Resultaten van de berekening van het nulalternatief	77
8.1 Resultaten bij een Rijnafvoer van 2200 m ³ /s	77
8.1.1 Waterbeweging	77
8.1.2 Sedimentbeweging en sedimentatie	79
8.2 Resultaten bij een Rijnafvoer van 3500 m ³ /s	82
8.2.1 Waterbeweging	82
8.2.2 Sedimentbeweging en sedimentatie	83
8.3 Resultaten bij een Rijnafvoer 5000 m ³ /s	87
8.3.1 Waterbeweging	87
8.3.2 Sedimentbeweging en sedimentatie	88
8.4 Uiteindelijke sedimentatie in de huidige situatie	91
8.5 Conclusies	94
9 Resultaten van de berekening van de HV2-min variant en de verdiepte geul	95
9.1 Resultaten bij de HV2-min variant	95
9.1.1 Waterbeweging	95
9.1.2 Sedimentbeweging en sedimentatie	97
9.2 Resultaten bij de verdiepte geul	100
9.2.1 Modelleren van de verdiepte geul	100
9.2.2 Waterbeweging	100
9.2.3 Sedimentbeweging en sedimentatie	101
9.3 Conclusies	103
10 Resultaten van de berekening van de alternatieven	105
10.1 Resultaten bij alternatief 1 : Onderwaterdam	105
10.1.1 Modelleren van alternatief 1	105
10.1.2 Waterbeweging bij alternatief 1	107
10.1.3 Sedimentatie bij alternatief 1	108
10.2 Resultaten bij alternatief 2 : Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep	111
10.2.1 Modelleren van alternatief 2	112
10.2.2 Waterbeweging bij alternatief 2	113
10.2.3 Sedimentatie bij alternatief 2	115
10.3 Resultaten alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul	117
10.3.1 Modelleren van alternatief 3	117
10.3.2 Waterbeweging bij alternatief 3	119
10.3.3 Sedimentbeweging bij alternatief 3	120
10.4 Andere alternatieven	121
10.5 Evaluatie en conclusies van de alternatieven	122
11 Conclusies en evaluatie	123
12 Aanbevelingen voor het verder onderzoek	125
Nawoord	127
Literatuurlijst	128

Inhoudsopgave Bijlagen

Voorwoord Bijlagen	1
Inhoudsopgave	2
Bijlage I	5
I.1 Historische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken	5
situatie in 1858	5
situatie in 1900	6
situatie in 1950	7
situatie in 1994	8
I.2 Optredende stroomsnelheden (in m/s) voor en na 1970	9
I.4 Getijvolumina (in 10 ⁶ m ³) voor en na 1970	11
I.5 Sedimentbeweging en sedimentatie in periode 1960-1968	12
I.6 Sedimentbeweging en sedimentatie in periode 1972-1973 en 1982-1989	13
I.7 Hoogtemodel Hollandsch Diep	14
I.8 Profielverandering 1930-1969 Anna Jacominaplaat-Moerdijk	15
I.9 Profielverandering na 1970	16
I.10 Ligging meetraaien van sedimentatie in gebied	17
I.11 Ligging meetpunten waterstanden stroomsnelheden in gebied	18
Bijlage II ZWENDL	19
II.1 Fysische achtergrond ZWENDL	20
II.2 Randvoorwaarden ZWENDL	22
Bijlage III WAQUA	23
III.1 Achtergrond WAQUA	23
III.1.1 Fysische achtergrond WAQUA	23
III.1.2 Numerieke achtergrond WAQUA	24
III.2 Rechthoekige en kromlijnige modellering WAQUA	26
III.3 Randvoorwaarden WAQUA	28
Bijlage IV Toetsing baggerspecie voor stortlocaties	31
IV.1 Toetsing Grootschalig Locatie - Papegaaiëbek	35
IV.2 Toetsing Cromstrijen	38
IV.3 Licht vervuild sediment	42
IV.4 Nieuwe stortlocaties	42

Bijlage V Resultaten Rijnafoer 2200 m ³ /s	43
V.1.1 Stroombeeld Nulalternatief	43
V.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt	47
V.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalt.	51
V.2.1 Waterbeweging met verdiepte geul	55
Waterstand Dordtsche Kil	55
Waterstand Moerdijk	55
Stroomsnelheden oversteek midden	55
Stroomsnelheden Zuid-Hollandsch Diep	55
V.3.1 Waterbeweging met alternatief 1	56
Waterstand Moerdijkbruggen	56
Waterstand Kop van het Land	56
Stroomsnelheden onderwaterdam zuid en midden	56
Stroomsnelheden Amer	57
Stroomsnelheden onderwaterdam noord	57
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	57
Stroomsnelheden Dordtsche Kil	57
V.4.1 Stroombeeld alternatief 2	58
V.4.2 Waterbeweging alternatief 2	62
Waterstand Zuid-Hollandsch Diep	62
Waterstand Dordtsche Kil	62
Stroomsnelheden Hollandsch Diep midden	62
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	62
Stroomsnelheden Hollandsch Diep west	63
Stroomsnelheden oversteek zuid	63
Stroomsnelheden oversteek midden	63
Stroomsnelheden oversteek noord	63
V.4.3 Sedimentatie bij alternatief 2	64
V.5.1 Waterbeweging bij alternatief 3	65
Stroomsnelheden oversteek noord	65
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	65
Stroomsnelheden Amer	65
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	65
V.5.2 Sedimentatie bij alternatief 3	66
Bijlage VI Resultaten Rijnafoer 3500 m ³ /s	67
VI.1.1 Stroombeeld Nulalternatief	67
VI.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde	71
VI.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij	75
VI.2.1 Spuibeheer Haringvlietsluizen voor HV2-min variant	77
VI.2.2 Randvoorwaarden WAQUA voor HV2-min variant	78
VI.2.3 Stroombeeld voor HV2-min variant	79

VI.2.4 Waterbeweging voor HV2-min variant	83
Waterstand Dordtsche Kil	83
Waterstand Moerdijk	83
Waterstand Kop van het Land	83
Waterstand Keizersveer	83
Waterstand Hollandsch Diep	84
Stroomsnelheden oversteek noord	84
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	84
Stroomsnelheden Hollandsch Diep west	85
Stroomsnelheden Zuid-Hollandsch Diep	85
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	85
Stroomsnelheden Dordtsche Kil	85
Stroomsnelheden Amer	86
VI.2.5 Sedimentatie HV2-min variant	87
Bijlage VII Resultaten Rijnafvoer 5000 m ³ /s	89
VII.1.1 Stroombeeld Nulalternatief	89
VII.1.2 Sedimentatieverloop gedurende het getijde	93
VII.3.1 Waterbeweging alternatief 1	97
Waterstand Moerdijkbruggen	97
Stroomsnelheden Zuid-Hollandsch Diep	97
Stroomsnelheden Dordtsche Kil	97
Stroomsnelheden onderwaterdam zuid	98
Stroomsnelheden onderwaterdam midden	98
Stroomsnelheden onderwaterdam noord	98
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	98
VII.4.1 Stroombeeld alternatief 2	99
VII.4.2 Waterbeweging alternatief 2	103
Waterstand Moerdijk	103
Waterstand Dordtsche Kil	103
Waterstand Kop van het Land	103
Waterstand Keizersveer	103
Stroomsnelheden oversteek zuid	104
Stroomsnelheden oversteek noord	104
Stroomsnelheden Hollandsch Diep west	104
Stroomsnelheden Amer	105
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	105
VII.4.3 Sedimentatie alternatief 2	106

Summary en Samenvatting

Summary

In 1966 some communities in the western part of Noord-Brabant decided to build a harbour and industrial area (IHM) near Moerdijk. This area can be reached by ocean-going vessels. These vessels have a maximum draught of 8,40 meters.

Since the closure of the Haringvliet and the Volkerak in 1970, there is deposition of silt and sand in the whole area. The depth of the Hollandsch Diep will decrease gradually. For that reason the vessels have to use a dredged crossing channel in the Hollandsch Diep to reach the IHM. This channel has to be redredged almost every year. Because of the decreasing depth in the Hollandsch Diep, the amounts of the dredged material and the costs increase.

This report is the result of a project at the Department of Transport and Public Works. The subject of this project was how to decrease the deposition of sediment in this crossing channel to the IHM. During this project the process of deposition and erosion of sediment is examined with numeric models for the simulation of the water movement and the sediment transport.

In the models the deposition in the crossing channel was 20% more than in the surrounding. In reality the deposition in the crossing channel is 100 to 200% more than in the surrounding.

With these models also are examined the changes in sediment transport for a new discharge controlprogramme of the Haringvlietsluizen (HV2-min), for a deeper channel and for three alternatives.

The computed changes as a result of a deeper channel were few, because of the inaccurate grid.

When the discharge controlprogramme of the Haringvlietsluizen will be changed, the deposition in the whole area will reduce. Just after changing the discharge control the deposition in the channel will increase. This is a temporary increase till there is an equilibrium depth.

In alternative 1 (a submerged dam upstream of the channel) only in the northern part of the channel there will be scour. In alternative 2 (semi-closure of the Zuid-Hollandsch Diep) there are more effects. In the whole channel the deposition will decrease and in the Zuid-Hollandsch Diep there is only deposition because of diffusion and tide difference. In the entrance of the Zuid-Hollandsch Diep the deposition will increase.

Alternative 3 (sediment reservoir) has a local influence only and has a small influence in the area as a whole.

Samenvatting

In 1966 besloten een aantal gemeenten in het westen van Noord-Brabant tot aanleg van het Industrie- en Havenschap Moerdijk (IHM). Deze haven is de verste landinwaarts gelegen zeehaven van Nederland. Schepen tot een diepgang van 8,40 meter kunnen het IHM bereiken.

Sinds de sluiting van het Volkerak en het Haringvliet in 1969 en 1970 vindt er in het hele gebied sedimentatie plaats. De diepte van het Hollandsch Diep neemt hierdoor elk jaar af. Daarom kunnen de zeeschepen vanuit Dordrecht het IHM alleen bereiken door gebruik te maken van een zeevaartgeul in het Hollandsch Diep. De onderhoudsbaggerkosten nemen elk jaar toe als gevolg van de verminderde diepte van het Hollandsch Diep.

In dit rapport zullen de resultaten behandeld worden van mijn onderzoek bij Rijkswaterstaat naar de mogelijkheden om de sedimentatie ter plaatse van de zeevaartgeul te verminderen of te stoppen. Tijdens het onderzoek is het proces van sedimentatie en erosie onderzocht en is gebruik gemaakt van numerieke modellen om de water- en sedimentbeweging te simuleren.

De berekening van de huidige situatie geeft als resultaat een sedimentatie in de geul die 20% hoger ligt dan in de omgeving. In werkelijkheid sedimenteert ongeveer 2 à 3 keer zoveel sediment in de geul als in de omgeving.

Ook is met deze modellen de verandering onderzocht voor een ander beheer van de Haringvlietsluizen (HV2-min variant), een verdiepte geul en drie waterbouwkundige ingrepen (alternatieven). Bij een ander beheer van de Haringvlietsluizen (HV2-min variant) zal de sedimentatie in het hele gebied verminderen. De sedimentatie in de zeevaartgeul neemt in eerste instantie toe, tot een evenwichtsdiepte is bereikt. De sedimentatie neemt als gevolg van een verdieping of verbreding van de geul nauwelijks toe. Waarschijnlijk komt dit door een te grote gridgrootte.

Bij alternatief 1 (onderwaterdam) vindt er alleen in het noordelijk deel van de zeevaartgeul ontgronding plaats. Alternatief 2 (gedeeltelijke afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep) geeft meer resultaat. De sedimentatie in de hele geul neemt af en in het Zuid-Hollandsch Diep vindt alleen nog sedimentatie plaats door diffusie en getijverschillen. In de monding van het Zuid-Hollandsch Diep neemt de sedimentatie toe.

Bij alternatief 3 (sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul) zijn de veranderingen in sedimentatie alleen lokaal duidelijk zichtbaar en is de invloed op het hele gebied vrij klein.

1 Inleiding

Reeds jaren kampen Rijkswaterstaat en het Industrie- en Havenschap Moerdijk (IHM) met een toename van de sedimentatie in de zeevaartgeul in het Hollandsch Diep, tussen de Dordtsche Kil en het IHM. Dit heeft geleid tot een toename van het baggerbezwaar. Nu onlangs besloten is om de geul te verdiepen om het IHM bereikbaar te maken voor grotere schepen, wordt de problematiek nog groter.

In het kader van mijn afstuderen heb ik een onderzoek gedaan naar de water- en sedimentbeweging in het Hollandsch Diep en naar de invloed van verschillende waterbouwkundige ingrepen op het sedimenttransport in het gebied. Bij dit onderzoek heb ik gebruik gemaakt van verschillende numerieke modellen die er van het gebied voor de water- en sedimentbeweging zijn (ZWENDL, WAQUA en DELWAQ).

Voor u ligt nu het eindrapport van dit afstudeeronderzoek. Hierin staan de belangrijkste resultaten en conclusies van het afstudeeronderzoek.

De bijlagen zijn als apart boekwerk bij dit hoofdrapport bijgevoegd.

Het hoofdrapport is als volgt opgebouwd:

In het tweede hoofdstuk is de historie van het gebied en de huidige geometrie beschreven. Verder is er in dit hoofdstuk aandacht voor de scheepvaartroutes in het Noordelijk Deltabekken en is vermeld welke waterdiepte nodig is om het IHM (Industrie- en Havenschap Moerdijk) te bereiken.

De probleemanalyse, doelstelling en alle randvoorwaarden, aannames en uitgangspunten zijn in hoofdstuk 3 vermeld.

Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de ontwikkeling van de water- en sedimentbeweging waarbij de situaties van voor en na de afsluiting van het Haringvliet en het Volkerak in 1970 worden behandeld. Tot slot van dit hoofdstuk worden de verschillende alternatieven uit de MER-beheer Haringvlietsluizen beschreven waarbij in het kort de veranderingen, die deze alternatieven in de water- en sedimentbeweging teweeg brengen, vermeld worden.

In hoofdstuk 5 komt aan de orde welke manier van modelleren tijdens dit onderzoek gebruikt is en hoe de hele waterbeweging gesimuleerd is. Speciale aandachtspunten hierbij zijn de gebruikte randvoorwaarden en de koppeling tussen de verschillende modellen.

Vervolgens zullen in de hoofdstukken 6 en 7 het gedrag van sediment en de modellering ervan beschreven worden. In hoofdstuk 6 zal de achtergrond van sediment ter sprake komen. Alle invoer die ik heb gebruikt om het gedrag van sediment te modelleren is beschreven in hoofdstuk 7.

In de hoofdstukken 8, 9 en 10 worden de uitkomsten van mijn onderzoek gepresenteerd. De huidige situatie is in hoofdstuk 8 beschreven, de HV2-min variant en de verdiepte geul in hoofdstuk 9 en de alternatieven in hoofdstuk 10. In hoofdstuk 11 volgen de conclusie en vindt een evaluatie plaats. In hoofdstuk 12 volgen de aanbevelingen voor verder onderzoek.

2 Historie en beschrijving van het gebied

2.1 Historie van het gebied

Het Hollandsch Diep ligt tussen Noord-Brabant, het eiland van Dordrecht en de Hoekse Waard. In het westen wordt het begrensd door het Haringvliet, Hellegatsplein en de Volkeraksluizen en in het oosten door de Brabantse Biesbosch, Nieuwe Merwede en de Amer.

Het Hollandsch Diep is ontstaan in 1421 bij de St. Elizabethsvloed op de plaats waar voor die tijd de Botervliet was. Sinds 1815 vormt het Hollandsch Diep de grens tussen Zuid-Holland en Noord-Brabant.

Als onderdeel van de Nederlandse Delta voert het Hollandsch Diep een deel van het aangevoerde Rijn- en Maaswater via het Haringvliet naar zee af. Het resterende deel van het Rijn- en Maaswater wordt via de Maasmond bij Rotterdam afgevoerd.

Al in 1740 was de toegang tot Rotterdam moeilijk door de aanzanding van de Maasmond. Om de toegang tot de Rotterdamse havens te verbeteren werden in 1868 de duinen bij Hoek van Holland doorgegraven. Hierdoor ontstond de Nieuwe Waterweg. De diepte van de Nieuwe Waterweg is toegenomen van 5,5 meter in 1870 tot 16,0 meter momenteel. Deze verdieping heeft geleid tot een toename van de verzilting in de delta van Rijn en Maas.

Rond 1870 is de Nieuwe Merwede uitgebaggerd. De Nieuwe Merwede was daarvoor een kil in de Biesbosch. Tegelijkertijd heeft men toen ook alle andere killen van de Biesbosch naar de Nieuwe Merwede afgesloten. Men heeft dit gedaan om de Beneden Merwede te ontlasten en de Biesbosch te behoeden voor dichtslibbing.

In 1904 kwam het tot een scheiding van de Maas en de Waal. Daartoe werd de Bergsche Maas gegraven en de Maas tussen Well en Andel afgedamd (dit werd de Afgedamde Maas). Hierdoor kon het Maaswater rechtstreeks via de Amer naar het Hollandsch Diep en het Haringvliet stromen.

De verdieping van de Nieuwe Merwede en het graven van de Bergsche Maas hadden als gevolg dat er door het Hollandsch Diep en het Haringvliet grotere debieten gingen stromen. Een direct gevolg daarvan was dat het Haringvliet en het Hollandsch Diep dieper werden.

In bijlage I.1 is de historische ontwikkeling van het Noordelijk Deltabekken te zien.

Het Haringvliet was tot 1970 een open zeearm. Deze open verbinding met de Noordzee zorgde voor een flinke getijdewerking en een groot debiet in het Hollandsch Diep.

In het kader van de Deltawet is besloten het Haringvliet af te sluiten van directe zee-invloed. In de monding van het Haringvliet werden spuisluizen gebouwd. Hierdoor veranderde de waterbeweging op het Haringvliet en het achterliggende gebied compleet. De debieten in het Hollandsch Diep werden aanzienlijk kleiner en ook het getijdeverschil bij Moerdijk is kleiner geworden. Dit heeft ertoe geleid dat het Hollandsch Diep en in mindere mate het Haringvliet door sedimentatie steeds ondieper werden. Tevens werd na de afsluiting in 1970 het water in het Hollandsch Diep zoet.

De Dordtsche Kil en het Spui zijn na de afsluiting van het Haringvliet door erosie juist dieper geworden.

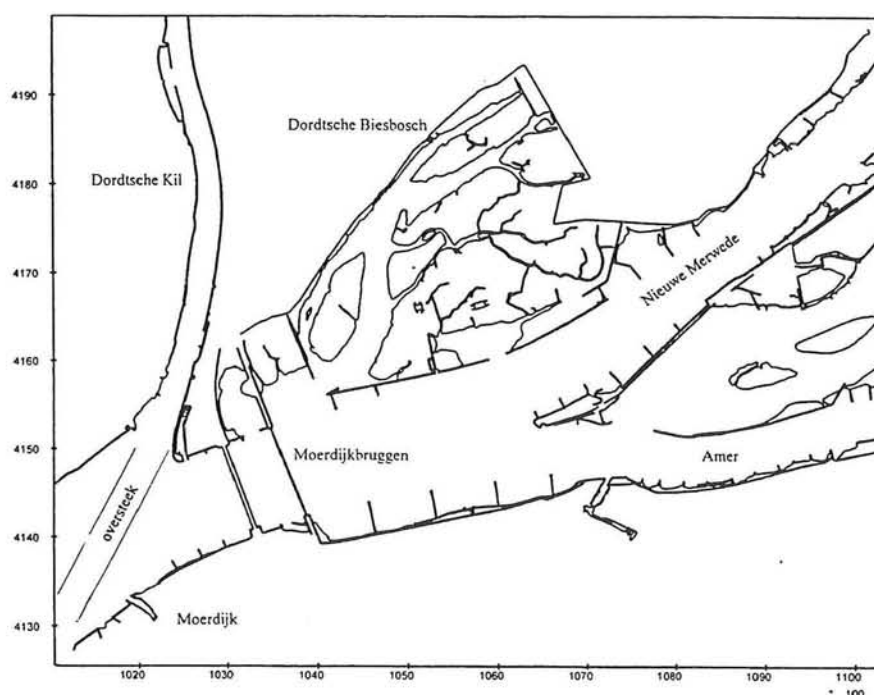
2.2 Geometrie van het gebied

De breedte van het Hollandsch Diep is aan oostzijde, daar waar de Nieuwe Merwede en de Amer in het Hollandsch Diep uitmonden, 1750 meter. Op deze plaats ligt de bodem op gemiddeld NAP -6,4 m.

Bij de Moerdijkbruggen, net bovenstrooms van de oversteek, is de breedte 1100 meter en ligt de bodem op gemiddeld NAP -7,0 m. Ten westen van het IHM, ter hoogte van Klundert is het Hollandsch Diep 2100 meter breed en ligt de bodem op gemiddeld NAP -8,5 m diep. In bijlage I.7 is het Hollandsch Diep en de bodemligging gepresenteerd.

Het Hollandsch Diep bestaat uit zowel diepe geulen als ondiepe platen en vooroevers. Het oostelijk deel, tussen de monding van de Nieuwe Merwede en de Amer en de Moerdijkbruggen, bestaat uit een vrij brede geul die dieper wordt in westelijke richting (van NAP -5,5 m tot NAP -6,5 m). De monding van de Nieuwe Merwede bestaat uit een diep zuidelijk gedeelte (NAP -5 m) en een ondiep noordelijk gedeelte (NAP -2 m). Het ondiepe gedeelte loopt tot in het Hollandsch Diep door.

De zuidoever van dit deel van het Hollandsch Diep wordt beschermd door kribben. Aan de noordkant ligt de Dordrechtse Biesbosch, een natuurgebied met veel killen. De Dordrechtse Biesbosch is door middel van een dammetje met daarin enkele openingen afgeschermd van het Hollandsch Diep. Ter plaatse van de Moerdijkbruggen, een spoorbrug en een verkeersbrug, zorgen de landhoofden voor een versmalling van het Hollandsch Diep. In bijlage I.7 zijn de ontgrondingskuilen achter de pijlers van de bruggen te herkennen. Het oostelijk deel is ongeveer 3500 meter lang. In figuur 2.1 is het oostelijke deel van het Hollandsch Diep getekend.



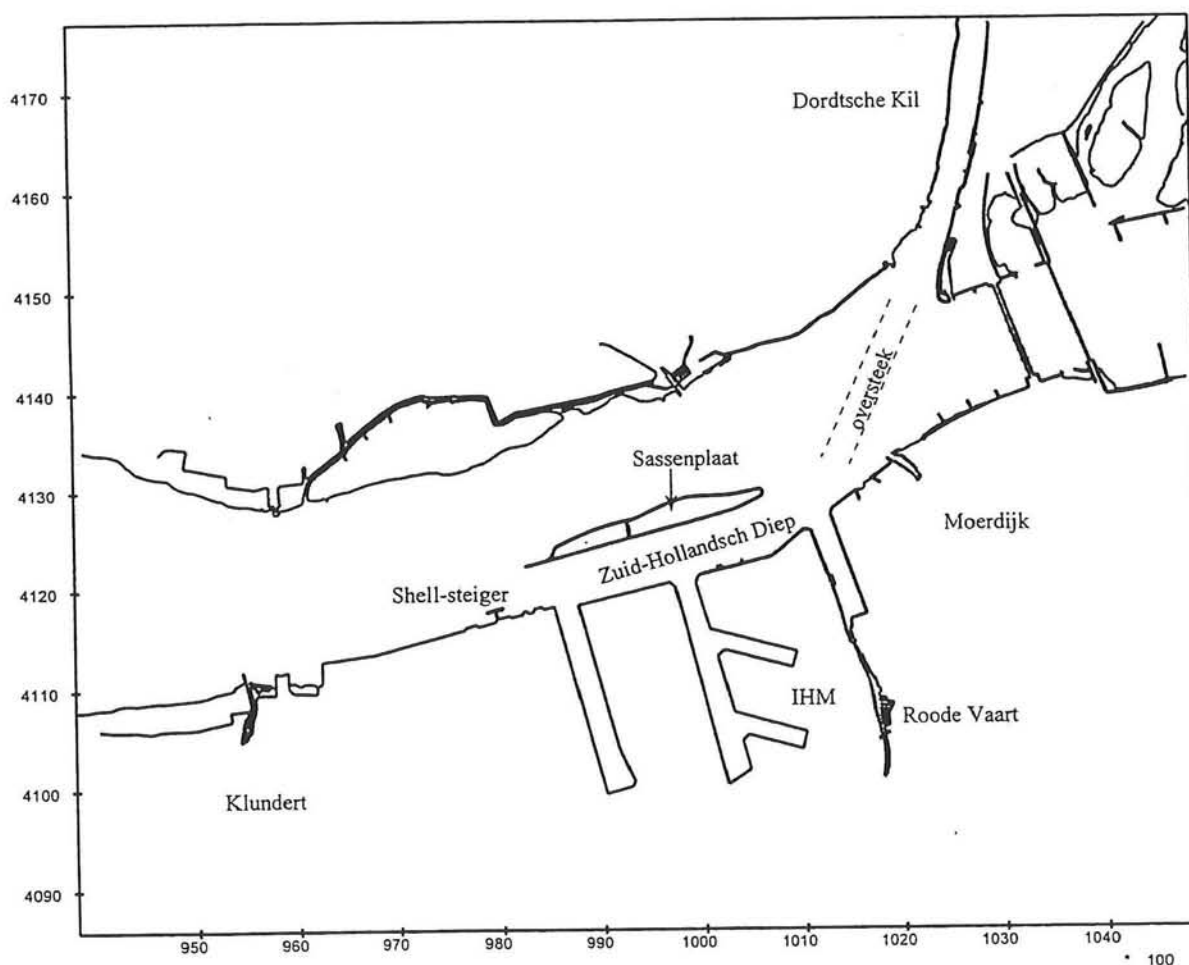
Figuur 2.1 Oostelijk deel Hollandsch Diep

Het gedeelte van het Hollandsch Diep dat tussen de Moerdijkbruggen en Klundert ligt bestaat deels uit diepe geulen. Bij de Sassenplaat en aan de noordkant van het Hollandsch Diep zijn er ondiepe vooroevers. De Sassenplaat deelt dit gedeelte van het Hollandsch Diep in tweeën. Het noordelijke deel is ongeveer 1300 meter breed, met aan noordzijde een ondiep gedeelte en aan zuidzijde een diepe geul die op NAP -9 à 10 m ligt.

Ten zuiden van de Sassenplaat ligt het Zuid-Hollandsch Diep, dat de toegang tot het IJM verschaft. Het Zuid-Hollandsch Diep is ongeveer 550 meter breed. De diepte van het Zuid-Hollandsch Diep is aan de oostkant ongeveer NAP -8,5 m en aan de westkant, bij de Shell-steiger NAP -11 m.

De oversteek over het Hollandsch Diep loopt van de monding van de Dordtsche Kil tot aan het Zuid-Hollandsch Diep en wordt door baggerwerkzaamheden op NAP -8,50 m gehouden (zie paragraaf 2.5). De breedte van de geul is gelijk aan de vaarbreedte van de Dordtsche Kil en is 140 à 150 meter. De oversteek over het Hollandsch Diep is 2 kilometer lang en het gedeelte in het Zuid-Hollandsch Diep is 3,5 kilometer lang. De Sassenplaat loopt in westelijke richting nog een stuk onder water door.

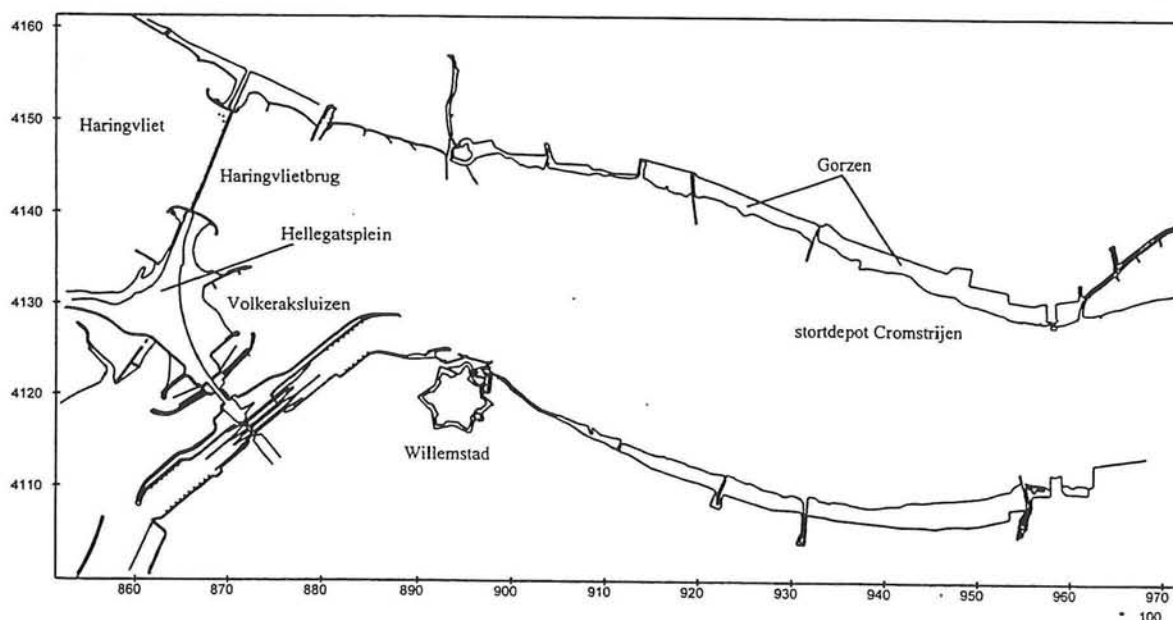
Dit gedeelte van het Hollandsch Diep is ongeveer 8500 meter lang. In figuur 2.2 is het middendeel van het Hollandsch Diep getekend.



Figuur 2.2 middendeel Hoilandsch Diep

Het gedeelte van het Hollandsch Diep dat tussen Klundert en Willemstad ligt, is het breedste gedeelte (tot 3000 meter breed). Aan de zuidkant ligt een diepe geul op NAP -13 m. Aan de noordzijde ligt de bagger- en stortlocatie Cromstrijen. In het midden van het profiel liggen twee ondiepe platen (NAP -3 m), die langzaam aan elkaar groeien. Aan de noordkant liggen een aantal gorzen zoals de Hoogezandsche Gorzen en de Oostersche Slobbegorzen. Aan de westkant wordt het Hollandsch Diep begrensd door de Haringvlietbrug en de Volkeraksluizen. De bodem van het Hollandsch Diep ligt hier gemiddeld op NAP -9 m.

Dit deel van het Hollandsch Diep is ongeveer 9500 meter lang. In figuur 2.3 is het westelijk deel van het Hollandsch Diep getekend.

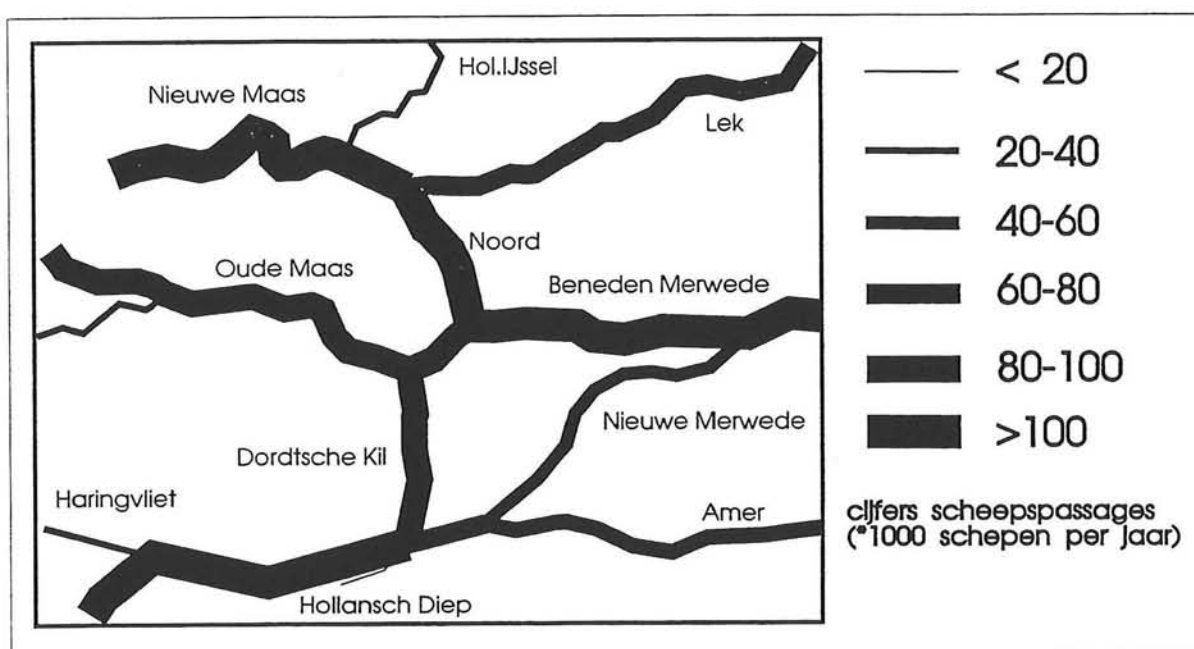


Figuur 2.3 Westelijk deel Hollandsch Diep

2.3 Scheepvaartroutes

Het Hollandsch Diep maakt deel uit van de scheepvaartroute tussen Rotterdam en Antwerpen. Deze route loopt via de Dordtsche Kil, het Hollandsch Diep, de Volkeraksluizen, het Volkerak en het Schelde-Rijnkanaal naar Antwerpen. Naast de scheepvaart tussen Rotterdam en Antwerpen, vaart over het Hollandsch Diep ook de scheepvaart van Antwerpen naar de Rijn. Ook de scheepvaart van en naar het Industrie- en Havenschap Moerdijk maakt gebruik van het Hollandsch Diep (zie paragraaf 2.4). Het Hollandsch Diep behoort daarom tot de hoofdassen van de binnenscheepvaart in Nederland.

Een schematisatie van deze verkeersstromen is weergegeven in figuur 2.4.



Figuur 2.4 Scheepvaartpassages Noordelijk Deltabekken

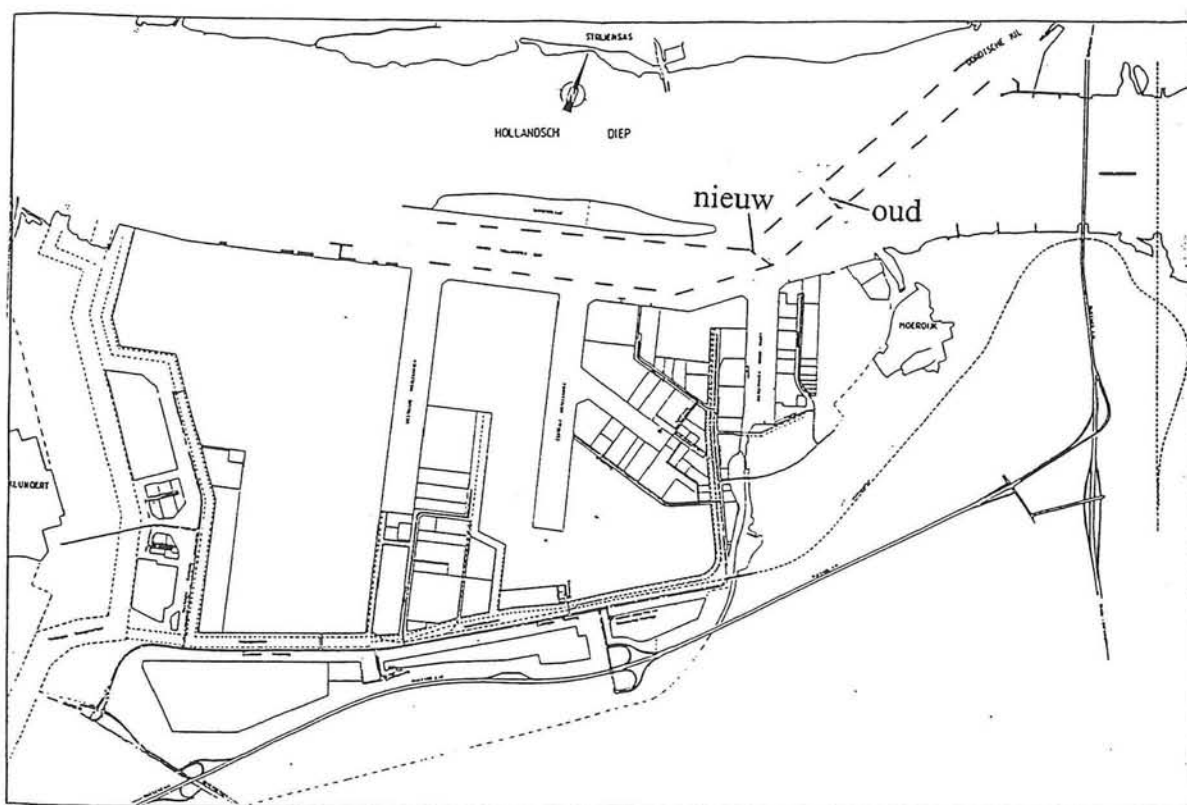
Deze cijfers geven het aantal passages van vrachtschepen over 1994 weer (uit RWS, 1992c). Naast vrachtschepen is er op het Hollandsch Diep ook veel recreatievaart. De waterdiepte is echter van minder belang voor de recreatievaart omdat de diepgang bij recreatievaart minder groot is dan bij vrachtschepen. In 1994 passeerden ongeveer 150.000 schepen de Volkeraksluizen waarvan ongeveer 100.000 vrachtschepen. De rest is recreatievaart en zeevaart (zoals vissersschepen, coasters). De maximale afmetingen van schepen die door de Volkeraksluizen kunnen is 175*22,80 meter (zesbaks-duwvaart) met een maximale diepgang van 19 voet (5,9 meter). In de Volkeraksluizen ligt de drempel op NAP -6,25 m. Tot aan Dordrecht kunnen schepen komen met een diepgang van 31 voet (9,45 meter). Het IHM kan bereikt worden door schepen met een maximale diepgang van 27,5 voet (8,50 meter) (zie paragraaf 2.5).

Het Hollandsch Diep is geschikt om er met zesbaks-duwvaart te varen (175*22,8*4,5 meter).

2.4 Industrie- en Havenschap Moerdijk (IHM)

In januari 1966 besloten de gemeenten Zevenbergen, Klundert en Hooge en Lage Zwaluwe (ZeKluZa-gemeenten) een buitendijks industrie- en havengebied aan te leggen bij de monding van de Roode Vaart. Dit deed men uit economische overwegingen. Het Industrie- en Havenschap Moerdijk (IHM), zoals dit industriegebied heet, heeft een aanvullende functie op Rotterdam en Antwerpen t.a.v. een aantal marktsegmenten (chemie, energie-opwekking, logistiek en milieutechnologie). Ook plaatsgebrek in de Rotterdamse haven kan door het IHM opgevangen worden. De eerste vestiging was die van Shell (uit IHM, 1993 a en b).

Het huidige terrein omvat netto 1160 ha. De uitgifte van bedrijfsgrond verloopt momenteel zeer goed en is één van de grootste in Nederland. In 1994 is in het IHM in totaal ca. 2 miljoen ton goederen overgeslagen uit zeeschepen. Het aantal zeeschepen dat het IHM aandeed, was 903. Het aantal binnenvaartschepen was ongeveer 5605. In de toekomst zal dit aantal, door de groei van het IHM, verder toenemen.



Figuur 2.5 Plattegrond IHM

2.5 Streefdieptes Zeevaartgeul

De zeeschepen die het IHM aandoen, varen vanuit Rotterdam via de Oude Maas en de Dordtsche Kil naar Moerdijk. Sedert 1976 maakt deze zeevaart gebruik van een geul in het Hollandsch Diep. Deze geul wordt nu (na 1994) door baggerwerkzaamheden op streefdiepte gehouden en kan bevaren worden door schepen met een maximale diepgang van 27,5 voet. De hiervoor benodigde waterdiepte bedraagt 8,50 meter (8,40 meter diepgang + 5 % kielspeling minus de gemiddelde laagwaterspiegel NAP +0,40 m). Een weergave van de berekende maten is in figuur 2.6 getekend.

Tot 1994 konden schepen met een maximale diepgang van 25,5 voet naar de Moerdijk varen. Vanaf 1994 is deze diepgang vergroot naar 27,5 voet. In de toekomst is het mogelijk dat deze diepgang nog verder zal toenemen tot 30,5 voet. De benodigde geuldiepte was tot 1994 8,50 meter. Dit komt voort uit de maximale diepgang van de schepen van **7,77 meter** (25,5 voet) met 10% kielspeling. De geul werd dus, uitgaande van een overeengekomen laagwaterstand (OLW) van NAP, tot **NAP -8,50 m** uitgebaggerd ($-7,77 - 0,77 + 0$).

Na 1994 is de voorwaarde voor de kielspeling voor de oversteek over het Hollandsch Diep op 5 % gesteld i.p.v. 10 %. Dit omdat in het Hollandsch Diep nauwelijks retourstroming is vanwege het grote doorstroomprofiel. Bovendien kunnen de kleinere schepen bij gevaar gemakkelijk uitwijken naar ondiepe gedeelten buiten de zeevaartgeul. De geuldiepte van 8,50 meter kan dus vanaf 1994 gelijk blijven terwijl de maximale diepgang van de grotere schepen toe kan nemen. Schepen met een diepgang van **8,40 meter** (27,5 voet) kunnen nu naar Moerdijk varen. Met een gemiddeld optredend laagwater (GLW) van NAP +0,40 m moet de geul dus ook in de toekomst een onderhoudsdiepte van **NAP -8,50 m** ($-8,40 - 0,42 + 0,40$) hebben.

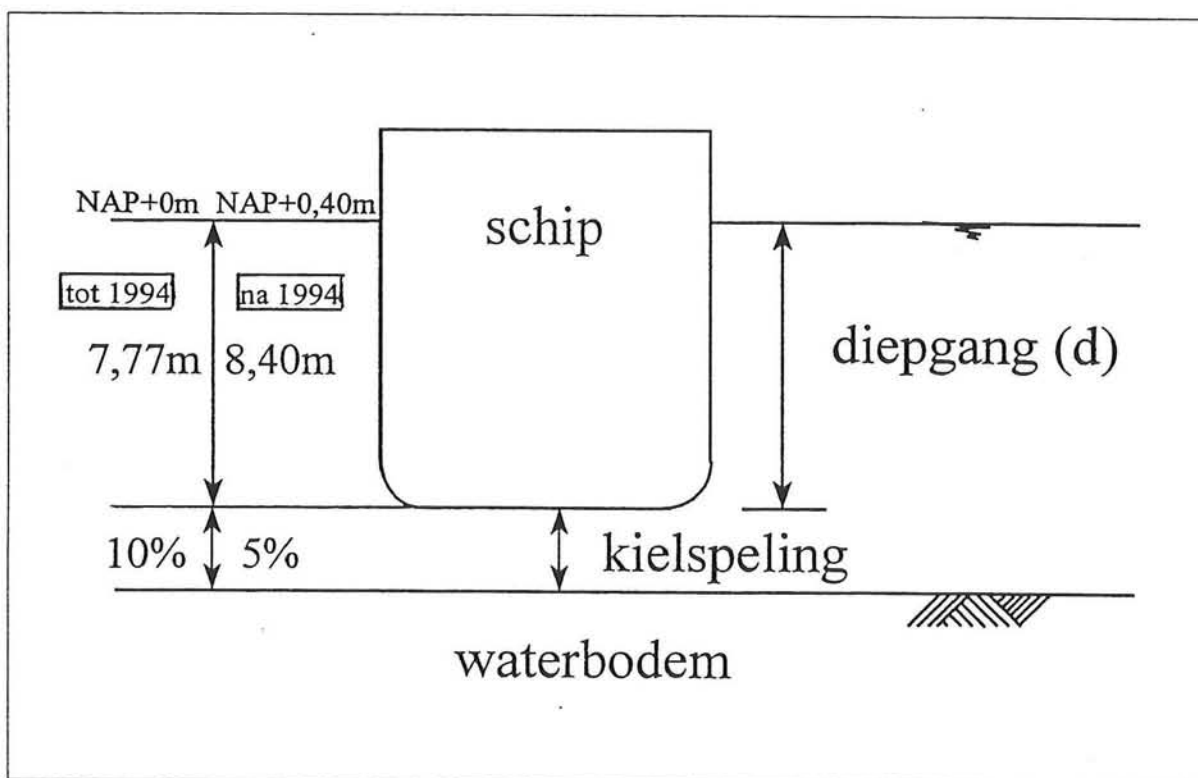
Uitgaande van de huidige waterdieptes in resterende deel van de verbinding met de Noordzee is een grotere diepgang mogelijk. De knelpunten liggen momenteel ter plaatse van de Kiltunnel en de oversteek van de Dordtsche Kil over het Hollandsch Diep. De Kiltunnel ligt op NAP -10,44 m. Met een gronddekking van 0,50 meter, een gemiddeld laagwater van NAP +0,30 m en een kielspeling van 10% geeft dit een maximale diepgang van **9,20 meter** ($(10,44 - 0,50 + 0,30)/1,1$). Dit is praktisch gelijk aan de garantiediepte bij Dordrecht.

De maximale diepgang van schepen die het IHM dus kunnen bereiken is 9,20 meter (30,19 voet). Met een gemiddeld laagwater van NAP +0,40 m betekent dit dat de onderhoudsdiepte voor de geul op **NAP -9,30 m** komt te liggen.

In tabel 2.1 zijn de bovengenoemde waarden vermeld

	diepgang schepen		kielspeling	maatgevende waterstand	bodempligging geul
	voet	meter			
tot 1994	25,5	7,77 meter	10%	NAP+0,00 m	NAP-8,50 m
na 1994	27,5	8,40 meter	5%	NAP+0,40 m	NAP-8,50 m
toekomst	30,2	9,20 meter	5%	NAP+0,40 m	NAP-9,30 m

Tabel 2.1 Streefdieptes Zeevaartgeul



Figuur 2.6 Berekening kielspeling

De zeevaartgeul is onder te verdelen in twee delen met elk een eigen beheerder (zie figuur 2.5). De oversteek over het Hollandsch Diep wordt beheerd en op diepte gehouden door Rijkswaterstaat. Het gedeelte van de geul aan Brabantse kant, het Zuid-Hollandsch Diep, wordt beheerd en op diepte gehouden door het IHM. Onlangs is besloten de scheidslijn tussen de twee gedeeltes in zuidelijke richting te verleggen. Het onderzoek zal de hele zeevaartgeul beslaan, dus zowel het IHM-gedeelte als het RWS-gedeelte.

3 Probleemanalyse

3.1 Inleiding

Na afsluiting van het Volkerak in april 1969 en het Haringvliet in november 1970 is de getijdewerking in het Hollandsch Diep sterk gereduceerd. Ook werden de debieten door het Hollandsch Diep kleiner. Het doorstroomprofiel bleef in eerste instantie ongewijzigd. Doordat na 1970 de debieten en daardoor ook de stroomsnelheden lager werden in het Hollandsch Diep, sedimenteerde veel, door de bovenrivieren aangevoerd materiaal. Dit leidde tot een verondieping in voornamelijk het oostelijk deel van het Hollandsch Diep.

De snelheid van verondieping in het gebied tussen de Dordtsche Kil en het IHM direct boven- en benedenstrooms van de zeevaartgeul is ongeveer 0,1 m/jaar. In de diepere zeevaartgeul is er sprake van extra verondieping (0,2 à 0,3 m/jaar). De zeevaartgeul wordt momenteel door baggerwerkzaamheden op diepte gehouden.

3.2 Probleemstelling:

In de toekomst wil men de bodemligging van de geul van NAP -8,50 m naar NAP -9,30 m brengen, zodat het IHM toegankelijk wordt voor grotere schepen. Momenteel is het baggerbezwaar per jaar gemiddeld $238,0 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (uit RWS, 1992b).

Zowel voor de huidige situatie als voor de toekomstige situatie wil men het baggerbezwaar verminderen.

3.3 Doelstelling:

Voor diverse waterbouwkundige ingrepen wil ik een voorspelling doen voor het sedimenttransport in het gehele gebied en voor de sedimentatie in de toegangsgeul naar het IHM.

3.4 Beperkingen

3.4.1 Uitgangspunten:

- Om de waterbeweging in het gebied te modelleren zijn de programma's ZWENDL (ééndimensionale modellering) en WAQUA (2DH-modellering) gebruikt. De uitvoer van het programma ZWENDL werd gebruikt als invoer voor het programma WAQUA.
- Bij de invoering in WAQUA is het gebied tot een vierkantenrooster geschematiseerd. Elk roostervak heeft specifieke eigen kenmerken (diepte, ruwheid e.d.).
- Om uit de waterbeweging het sedimenttransport en de sedimentatie en erosie plaatselijk te bepalen is het programma DELWAQ gebruikt.
- Naast de berekeningen met numerieke modellen zijn ook handmatige berekening uitgevoerd, gebaseerd op veranderingen in het verleden, met als doel de resultaten van de numerieke berekening te controleren.
- Als beginsituatie zijn de huidige situatie (bodempligging geul NAP -8,50 m) en de verdiepte geul (bodempligging geul NAP -9,30 m) als uitgangspunt genomen. De rest van het gebied is afkomstig uit het DTM 1993 (Digitaal Terrein Model).
- De dichtheid van water is 1005 kg/m^3 .
- De mate van erosie is afhankelijk van de stroomsnelheden en een erosieconstante. De mate van sedimentatie is afhankelijk van de stroomsnelheden, de valsnelheden van het materiaal en de concentratie van het materiaal.
- Het bodemtransport wordt gemodelleerd door voor de zandfractie de stroomsnelheid voor erosie kleiner te laten zijn dan die voor sedimentatie.
- De dispersie is afhankelijk van de stroomsnelheid en de waterdiepte.

3.4.2 Aannames:

- Het gebied waar het onderzoek zich op richt omvat het Hollandsch Diep, de Amer, de Nieuwe Merwede benedenstrooms van Kop van het Land en het zuidelijke deel van de Dordtsche Kil. Dit gebied is groot genoeg om de invloed van de rand op de zeevaartgeul te minimaliseren. Ook zullen havenbekkens van het IHM in de berekening meegenomen worden.
- Een tweedimensionale horizontale modellering van de water- en sedimentbeweging en de gebruikte roosterafstand van 100 m. in de programma's WAQUA en DELWAQ zijn in eerste instantie nauwkeurig genoeg voor dit onderzoek.
- Voor de modellering van het gedrag van sediment is gebruik gemaakt van een zandfractie,

een grof slibfractie en een fijn slibfractie.

-Voor de modellering van het gedrag van sediment is voor het sedimentatieproces onderscheid gemaakt tussen de zandfractie, de grof slibfractie en de fijn slibfractie. Voor het erosieproces is dit onderscheid niet gemaakt en hebben alle fracties dezelfde parameters.

-Vlokvorming hoeft niet apart in de modellering te worden meegenomen. Evenals consolidatie en fluïdisatie.

-Het bodemmateriaal heeft de volgende samenstelling: 20% zand, 60% grof slib en 20% fijn slib.

3.4.3 Randvoorwaarden:

-De randvoorwaarden voor de berekening met het programma ZWENDL (ééndimensionale modellering) aan bovenstroomse zijde zijn de debieten op de Waal (bij Tiel), de Lek (bij Hagestein) en de Maas (bij Keizersveer). Dit zijn debieten die passen bij Rijnafteroer (bij Lobith) van 2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s. Voor de Maasafvoer is een afvoer gekozen met een onderschrijdingskans van 50% bij de gekozen Rijnafteroer.

-De randvoorwaarden voor de berekening met ZWENDL aan benedenstroomse zijde zijn het slotgemiddelde getij van 1991 bij Hoek van Holland en het Zeegat van Goeree.

-Bij de berekening met het numerieke model van het onderzoeksgebied in het programma WAQUA (2DH-modellering) zijn de waterstanden en debieten, berekend met ZWENDL, op de randen opgelegd. Deze gelden voor het huidige spuibeheer van de Haringvlietsluizen en de HV2-min variant (zie voor uitleg paragraaf 4.3).

-Het voornaamste doel van de modellering van de waterbeweging is om een goed beeld te krijgen van de optredende waterbewegingen (snelheden en richting). De stroomsnelheid is van essentieel belang voor het gedrag van sediment.

-Als randvoorwaarde voor het morfologisch onderzoek zijn op de randen van de modellen, voor elke afvoer en voor elke stof, de in de tijd gemiddelde concentraties voor zwevend stof opgelegd.

-Voor het oplossen van de continuïteitsvergelijking en bewegingsvergelijkingen voor de waterbeweging wordt gebruik gemaakt van de ADI-methode. Voor het oplossen van de advectie-diffusievergelijking voor de sedimentbeweging wordt gebruik gemaakt van het schema Lax-Wendroff.

-Gedurende de eventuele bouw en na voltooiing van de ingrepen moeten de scheepvaartroutes bevaarbaar blijven. Dit houdt in dat de stroomsnelheden in langs- en dwarsrichting niet te hoog mogen zijn (maximaal 1 m/s).

4 Water- en sedimentbeweging verleden, heden en toekomst

Zoals in de probleemstelling al genoemd, is de afsluiting van het Volkerak en het Haringvliet van essentieel belang geweest voor de water- en sedimentbeweging in het gebied. In het volgende hoofdstuk is daarom de water- en sedimentbeweging van voor 1970, van na 1970 en van de toekomst beschreven. Verder zullen ook de varianten in het spuibeheer van de Haringvlietsluizen zoals die meegenomen worden in de MER-beheer Haringvlietsluizen behandeld worden.

4.1 Situatie voor 1970

4.1.1 Waterbeweging voor 1970

Voor de afsluiting van het Volkerak in 1969 en het Haringvliet in 1970 was het Haringvliet een open zeearm. In de hele zuidrand van het Noordelijk Deltabekken zorgde dit voor een grote getijbeweging met grote debieten en stroomsnelheden. Bovendien werd een groot gedeelte van de Rijn- en Maasaanvoer via het Hollandsch Diep, het Volkerak en het Haringvliet naar zee afgevoerd. Door de open verbinding met zee was het water bij Moerdijk zout.

Voor de gegevens over de waterbeweging voor 1970 is gebruik gemaakt van de nota "De geschiedenis van de ontwikkeling van de waterbeweging en het profiel van de rivieren in het Noordelijk Deltabekken over de perioden 1870-1970-1976" (Haring, 1977) van Rijkswaterstaat.

De getij-invloed op het Haringvliet en Hollandsch Diep werd tot 1966 steeds groter. In bijlage I.3 vindt u de grootte van de getijvolumes van 1934 en 1966. Een getijvolume is het totale volume dat per getij bij vloed het Deltabekken instroomt (vloedvolume) en bij eb uitstroomt (ebvolume). In 1966 was het vloedvolume bij Moerdijk 104 mln. m³ en het ebvolume 155 mln. m³.

Omdat de getij-invloed is toegenomen zijn in deze periode het Haringvliet en het Hollandsch Diep uitgeschuurd.

De watersnelheden voor en na de afsluiting vindt u in bijlage I.2. De maximale watersnelheden in het Hollandsch Diep lagen voor 1970 rond de 1 m/s. Bij een lage Rijnaafvoer waren de maximale stroomsnelheden van de vloedstroom groter dan die van de ebstroom. Bij een hoge Rijnaafvoer is dit juist omgekeerd. De horizontale getijbeweging was bij een lage Rijnaafvoer zelfs voorbij Werkendam te merken.

Het gemiddeld hoogwater bij Moerdijk was voor 1970 ongeveer NAP +1,30 m en het gemiddeld laagwater was ongeveer NAP -0,80 m. Het getijverschil was dus in de orde van 2 meter bij Moerdijk.

De inhoudsverandering van het Hollandsch Diep op het traject Dordtsche Kil-Anna Jacominaplaat vindt u in bijlage I.8. De gemiddelde diepte voor de afsluiting was ongeveer NAP -9 à 10 m. Vooral de geul tussen Sassenplaat en Moerdijk (Zuid-Hollandsch Diep) was diep (NAP -12 m). Deze geul is door baggerwerk op diepte gebracht.

4.1.2 Sedimentbeweging voor 1970

Voor 1970 was het bodemprofiel in het zuidelijk deel van het Noordelijk Deltabekken min of meer in evenwicht. De aanvoer van sediment door de bovenrivieren en bij vloed door de zee was ongeveer even groot als de afvoer van sediment naar de zee. Door de forse eb- en vloedstromingen trad zowel erosie als sedimentatie op. In het bekken sedimenteerde hoofdzakelijk het zand, terwijl het slib naar zee werd afgevoerd. Oostelijk van de Moerdijk sedimenteerde nagenoeg uitsluitend grofkorrelig rivierzand en westwaarts van Willemstad voornamelijk minder grof zeezand, terwijl in het tussenliggende gedeelte van het Hollandsch Diep zowel zee- als rivierzand werd afgezet. De enige veranderingen in de bodemligging werden bepaald door seizoensafhankelijke rivierafvoeren en waren niet structureel van aard (uit RWS, 1992a).

In bijlage I.5 is de globale zandbalans in de periode 1960-1968 te zien.

4.2 Situatie in de periode 1970-1995

4.2.1 Waterbeweging in de periode 1970-1995

Na de afsluiting van het Volkerak en het Haringvliet (1969/1970) is de getijbeweging in het Hollandsch Diep aanzienlijk afgenomen. De enige open zeeverbinding was vanaf 1970 de Nieuwe Waterweg bij Rotterdam. Het water stroomt vanuit het Hollandsch Diep dan via de Dordtsche Kil, Oude Maas, en de Nieuwe Waterweg naar de Noordzee.

Het Haringvliet is afgesloten van de Noordzee door middel van spuisluizen en schutsluizen voor de scheepvaart. Het spuibeheer was omschreven in het Normaal Lozingsprogramma 1970 (NLP-'70). Hierin werd voorgeschreven dat de schuiven gedeeltelijk geopend werden vanaf een Rijnafvoer van 2000 m³/s. Het openen gebeurt als het waterniveau in het Haringvliet hoger is dan op de Noordzee (bij eb). Hierdoor kan alleen zoetwater het Haringvliet uitstromen en geen zout water het Haringvliet instromen. Het Haringvliet veranderde door de afsluiting in 1970 van een zoutwaterbekken in een zoetwaterbekken. In de praktijk werd met behulp van de metingen van de zoutindringing op het Haringvliet, bepaald wanneer de sluisen dicht gingen.

Door alleen bij een hogere waterstand op het Haringvliet te spuien ontstond er een schijngetijde op het Haringvliet en het Hollandsch Diep. Een schijngetijde houdt in dat een deel van het getijde rechtstreeks wordt beïnvloed door het getij op de Noordzee en een deel juist niet.

Door de afsluiting stroomde het Rijn- en Maaswater vaker via andere waterwegen dan voor 1970 naar zee. Daardoor werden bijvoorbeeld debieten op de Beneden Merwede groter ten koste van die op de Nieuwe Merwede.

De getijvolumes op het Haringvliet en het Hollandsch Diep liepen hierdoor aanzienlijk terug (zie bijlage I.4). Bij Moerdijk werd het gemiddelde ebvolume 39 mln. m³ (in 1966: 155 mln. m³) en het gemiddelde vloedvolume verdween zelfs geheel (in 1966: 104 mln. m³). Er is dus altijd een westwaarts gerichte stroming (geen horizontaal getij). Ook namen de maximale watersnelheden in het Hollandsch Diep af (zie bijlage I.2). De maximale stroomsnelheid bij Moerdijk werd 0,15 m/s.

De Dordtsche Kil en het Spui zijn bij dichte Haringvlietsluizen de waterwegen waardoor de afvoer van het Hollandsch Diep en Haringvliet plaatsvindt. Op de Dordtsche Kil werden de getijvolumes en debieten daardoor groter. Het vloedvolume werd 2 keer zo groot en het ebvolume zelfs 3 keer zo groot als dat van voor 1970. De waterbeweging keerde op de Dordtsche Kil ook om. Het water stroomde voor 1970 bij vloed van zuid naar noord en bij eb in omgekeerde richting. Na 1970 was dit precies andersom. Hieruit kan geconcludeerd worden dat voor de afsluiting van het Haringvliet, de getijbeweging in de Dordtsche Kil bepaald werd door de getijbeweging op het Hollandsch Diep. Na de afsluiting werd de getijbeweging bepaald door de getijbeweging op de Oude Maas en de Noord.

De optredende waterstanden veranderden ook grotendeels. Voor 1970 was het gemiddeld getijverschil bij Moerdijk nog 2 meter, na 1970 werd dit verschil slechts 0,25 meter. Het gemiddeld hoogwater is NAP +0,65 m en het gemiddeld laagwater is NAP +0,40 m.

In het begin van de jaren tachtig besloot men om het spuibeheer voor de Haringvlietsluizen aan te passen. Reden hiervoor waren de betere (numerieke) rekenmethodes en het feit dat er vaak van het oude spuiprogramma (NLP-'70) werd afgeweken. Dit kwam omdat de geometrie van het gebied veranderd was t.o.v. 1970 en andere belangen mee gingen spelen. Criteria die gebruikt werden bij het opstellen van een nieuw spuibeheer (LPH-'84, zie RWS, 1987) waren:

- een minimale waterstand bij Moerdijk van 0,00 m t.o.v. NAP
- een minimaal debiet door de Nieuwe Waterweg van 1500 m³/s

Het eerste criterium kwam voort uit de eis dat het Industrie- en Havenschap Moerdijk bereikbaar moest blijven voor grote zeeschepen. Het tweede criterium was het gevolg van de behoefte om uit de Hollandsche IJssel zoetwater voor landbouw te kunnen onttrekken. De waterbeweging is ten opzichte van de situatie van voor 1984 niet veel veranderd, behalve voor hogere Rijnafoeren. Bij een Rijnafoer van boven de 3900 m³/s wordt er minder via de Haringvlietsluizen gespuid om de waterstand bij Moerdijk niet onder NAP te laten komen. Het IHM hanteert sinds 1994 een maatgevende waterstand van NAP+0,40 m (zie paragraaf 2.5).

4.2.2 Sedimentbeweging in de periode 1970-1995

Met de afsluiting van het Volkerak en het Haringvliet werd het dynamisch morfologisch evenwicht in het Deltabekken verstoord. De aanvoer van sediment door de Rijn en de Maas veranderde niet. Wel waren er net als voor 1970 periodes met een hoge sedimentaanvoer en periodes met een lage sedimentaanvoer. Globaal voert de Waal ongeveer 0,75 mln. m³ zand en 2,4 mln. ton slib per jaar aan. De Maas voert per jaar ongeveer 0,2 mln. m³ zand en 0,45 mln. ton slib aan.

De zee-aanvoer is na 1970 voor de zuidelijke rand geheel weggefallen. Echter ook de afvoer naar zee via het Haringvliet werd een fractie van wat het voor 1970 geweest was (momenteel ongeveer 0,3 mln. ton slib per jaar).

Omdat de sedimentaanvoer gelijk is gebleven en de watersnelheden zijn afgenomen is er in

het Deltabekken veel sedimentatie opgetreden. Dit proces is begonnen in het oostelijk deel van het bekken en verplaatst zich langzaam westwaarts (gegevens uit RWS, 1984, 1990 en 1995b).

In bijlage I.6 zijn de schematisaties van de sedimentbeweging in de periode 1972-1973 en de sedimentbeweging in de periode 1982-1989 getekend.

In hoofdstuk 8 wordt de sedimentbeweging uitgebreider behandeld.

Sedert 1970 is in het bekken ruim 100 mln. m³ riviersediment, afkomstig uit de Maas en de Waal afgezet. Dit sediment is voornamelijk slib (RWS, 1992a).

Erosie treedt alleen nog lokaal op als gevolg van hoge stroomsnelheden (Dordtsche Kil) en door windgolven (in ondiepe gedeeltes). Onder de huidige omstandigheden zal de sedimentatie in het bekken nog vele decennia doorgaan, waarbij het zwaartepunt van de sedimentatie zich richting het westen verplaatst. Op dit moment ligt het zwaartepunt voorbij Moerdijk, ter hoogte van de Sassenplaat. Waarschijnlijk zal zonder menselijk ingrijpen er een systeem ontstaan van enkele ondiepe geulen die tussen zand- en slibplaten doorlopen. In bijlage I.9 is inhoudsverandering inclusief baggerhoeveelheden in de periode 1970-1993 getekend.

Een gedetailleerde beschrijving van de wijze waarop de sedimentatie in het Hollandsch Diep plaatsvindt, wordt gegeven in paragraaf 6.6.2.

4.3 MER- beheer Haringvlietsluizen / Toekomstige waterbeweging

Bij Rijkswaterstaat wordt momenteel een MER-studie (Milieu Effect Rapportage) gedaan naar de mogelijkheid om het spuibeheer van de Haringvlietsluizen opnieuw te veranderen. Reden hiervoor is dat door de huidige wijze van beheer een aantal ongewenste (neven)effecten optreedt die groter zijn dan destijds verwacht werd. Deze problemen betreffen niet alleen het op diepte houden van vaarwegen, maar ook de veranderde biologische omstandigheden waardoor langzaam de flora en fauna verandert. Ook wordt er anders aangekeken naar het belang van natuurontwikkeling en ecologische barrières. Door de reductie van de getijslag, van 2 meter naar 0,25 meter, is een aanval op de oevers ontstaan. Hierdoor zijn de stabiele flauwe hellingen veranderd in steilere onstabiele oevers. Aan zeezijde is het evenwicht verstoord doordat periodes, waarin vrijwel geen zoetwater wordt gespuid, afgewisseld worden met periodes waarin grote hoeveelheden zoetwater in de Voordelta terechtkomen. Hierdoor kunnen alleen storingstolerante planten- en diersoort en overleven. In plaats van veel soorten in kleine aantallen, leven er nu weinig soorten in grote aantallen. De sluizen vormen ook een ernstige belemmering voor trekvis die de rivieren op willen zwemmen (bijv. zalm).

Ook wil men de gevolgen van een grotere zoutindringing in de Zuidrand onderzoeken.

Bij deze MER-studie onderzoekt men vier verschillende spuiprogramma's voor toekomstig gebruik:

- Huidige spuiprogramma (LPH-'84)
- Stormvloedkering-variant
- HV2-min variant
- Ecologisch alternatief

In het Integraal Beleidsplan Haringvliet, Hollandsch Diep, Biesbosch zijn ook een aantal variërende spuiprogramma's beschreven die erg op bovengenoemde spuiprogramma's lijken. In eerdere rapporten zijn deze spuiprogramma's dan ook (ten onrechte) als onderdeel van de MER-beheer Haringvlietsluizen omschreven. Het huidige spuiprogramma is daarin omschreven als variant HV0, de stormvloedkeringsvariant is omschreven als variant HV4 en ook de HV2-min variant is afkomstig uit dit beleidsplan.

Het huidige spuibeheer van de Haringvlietsluizen (LPH-'84) wordt bekeken omdat men voor een toekomstige situatie het handhaven van het huidige spuibeheer eenvoudig kan vergelijken met andere alternatieve spuiprogramma's. Op die manier zijn de voor- en nadelen van andere spuiprogramma's te bepalen.

Het huidige spuibeheer is gebaseerd op de situatie van voor 1984 waarbij twee criteria gelden (zie paragraaf 4.2.1). Het eerste criterium, een minimale waterstand van NAP bij Moerdijk, komt voort uit de eis dat Moerdijk bereikbaar moet blijven voor grote zeeschepen (zie paragraaf 2.5). Het tweede criterium, een minimale afvoer van rivierwater van 1500 m³/s door de Nieuwe Maas, komt voort uit de eis dat er geen zout water de Hollandsche IJssel op mag stromen. Tevens moet het Haringvliet een zoetwaterbekken blijven, wat inhoudt dat er alleen gespuid wordt als de waterstand op het Haringvliet hoger is dan op de Noordzee. De zoutindringing op het Haringvliet moet zoveel mogelijk beperkt blijven.

De criteria zoals opgesteld in de spuiprogramma LPH-'84 worden gemakkelijk gehaald met het huidige spuiprogramma. Een voorbeeld hiervan is dat de waterstand bij Moerdijk die nu maatgevend is voor de onderhoudsdiepte van de zeevaartgeul NAP +0,40 m is in plaats van NAP (zie paragraaf 2.5).

Bij het huidige spuibeheer (LPH-'84) staat de Haringvlietsluizen alleen open wanneer zoetwater naar zee kan stromen. Het zoute zeewater kan daarom slechts in verwaarloosbare hoeveelheden in het Haringvliet terechtkomen. Het Haringvliet is dus een zoetwaterbekken. Daarom is het water uit het Haringvliet geschikt voor landbouw en wordt het onder andere gebruikt in het Westland, in de tuinbouwkassen. De inlaatpunten van de leidingen waardoor het zoete water wordt getransporteerd zitten in het Spui.

De HV2-min variant is een spuiprogramma waarbij de zouttong op het Haringvliet tot aan de mond van het Spui reikt. Enerzijds blijft hierdoor het Spui, en dus het water voor het Westland, zoet. Anderzijds zal door de grotere uitwisseling van water met de Noordzee, het proces van sedimentatie (op het Hollandsch Diep) en erosie (op de Dordtsche Kil) minder snel verlopen dan in de huidige situatie. Ter plaatse van de zoutscheiding, in het westelijk deel van het Haringvliet kan de sedimentatie toenemen ten gevolge van het ontstaan van een turbidity maximum (Dyer, 1988).

De flora en fauna in vooral het westelijk deel van het Haringvliet zal bij deze variant veranderen. In dit deel van het Haringvliet komt weer zout water, wat een grotere verscheidenheid aan soorten oplevert. De bereikbaarheid van het IHM wordt in eerste instantie iets slechter bij de HV2-min variant, maar er zal in de toekomst in vergelijking met de HV0-variant minder gebaggerd hoeven te worden.

Deze variant heet de HV2-min variant omdat de eerdere HV2-variant uit het Integraal Beleidsplan, die doorberekend was met een ééndimensionaal waterbewegingsmodel (ZWENDL), niet voldeed aan de eis van een zouttong die de mond van het Spui bereikt. Dit gebeurde omdat er te weinig rekening gehouden was met tweedimensionale verticale effecten en de rol die diepe geulen hierin spelen.

Zoals hierboven al beschreven, zorgt een grote uitwisseling van getijvolumes met de Noordzee voor een reductie van de sedimentatie en de erosie in het gebied en is gunstig voor de verscheidenheid aan soorten planten en dieren. De stormvloedkering-variant is hiervan een uitvloeisel.

Bij deze variant zal de zouttong tot aan de Volkeraksluizen reiken. De Haringvlietsluizen worden dan als stormvloedkering gebruikt en zullen alleen gesloten worden bij een hoge waterstand op de Noordzee. Deze variant zal tot gevolg hebben dat het gebied grotendeels de geometrie van voor 1970 terugkrijgt. Het IHM zal daardoor in de toekomst beter bereikbaar worden voor de scheepvaart. De onderhoudsbaggerkosten van de zeevaartgeul zullen omlaag gaan. Voordat de stormvloedkering-variant ingevoerd kan worden zullen eerst de scheepvaartgeulen op de Hollandsch Diep en in de Nieuwe Merwede en de Dordtsche Kil verdiept moeten worden omdat de GLW-stand zal dalen naar ongeveer NAP-0,80 m. Dit brengt initiële kosten met zich mee.

Behalve dat de hele flora en fauna door deze varianten zullen veranderen, zal deze variant ook grote gevolgen hebben voor de waterinname uit het Haringvliet, Hollandsch Diep en het Spui (bv. voor landbouw). Het water in het gebied wordt weer zout en is daarom niet

meer geschikt voor de landbouw.

Het ecologisch alternatief is nog niet precies gedefinieerd. Deze variant zal tegemoet komen aan het zoutbezwaar zonder teveel verticaal getij in te leveren. Hierdoor kan dan zowel de waterinname doorgang vinden als de ecologische ontwikkeling gestimuleerd worden. Men streeft ernaar om het zoutbezwaar niet verder dan de inlaatpunten te laten komen en een getijslag van ongeveer 0,9 meter te realiseren in de Biesbosch.

Momenteel zijn er ook nog plannen om behalve de bovenstaande varianten een extra variant te ontwikkelen dat het meest tegemoet komt aan de ecologische ontwikkeling. Deze variant gaat het Meest Waardevolle Natuuralternatief heten.

Bij alle varianten zal de geometrie van het gebied veranderen. Op sommige plaatsen zal (meer) sedimentatie gaan optreden, op andere plaatsen juist (meer) erosie. In het gebied is in de afgelopen tientallen jaren veel sediment afgezet. Vooral het sediment dat voor 1980 is afgezet is zwaar vervuild (klasse 4, zie paragraaf 6.6.1). Op deze laag van sediment is een laag schoner sediment gekomen, die de vervuilde laag min of meer heeft afgedekt. Deze laag is later afgezet en is schoner omdat in de Rijn- en Maasverdragen is afgesproken dat lozingen in deze rivieren aan bepaalde normen moeten voldoen. Wanneer er nu door een ander spuiprogramma erosie van de waterbodem plaatsvindt, is de kans groot dat het zwaar vervuilde sediment weer in suspensie komt. Dit kan schade toebrengen aan de waterflora en -fauna. Om dit te voorkomen zal voordat het spuibeheer veranderd zal worden, de waterbodem eerst deels gesaneerd moeten worden. De eerste proeven hiermee op het Spijkerboor en de Nieuwe Merwede zijn zeer positief (zie RWS, 1995a).

Ook voor andere kustgebieden in Nederland hebben deze varianten gevolgen. Omdat het overheersende langstransport langs de Nederlandse kust in de richting Zuid-Noord verloopt, zal het sediment dat via de Haringvlietsluizen in zee terechtkomt in noordelijke richting getransporteerd worden. Dit kan problemen opleveren voor de Maasgeul bij Hoek van Holland.

In tabel 4.1 staan de karakteristieke waarden van de waterbeweging bij Moerdijk voor de verschillende perioden nogmaals vermeld. Deze waarden gelden voor een Rijnafvoer van ca. 2200 m³/s en een gemiddeld getij.

	ebvolume (in mln. m ³)	vloedvolume (in mln. m ³)	GHW (in m+NAP)	GLW (in m.+NAP)	v _{max} (in m/s)	v _{min} (in m/s)
1966	155	104	+1,33	-0,79	0,75	-0,85
1970-84	39	0	+0,65	+0,39	0,10	0,05
1984-nu	40	0	+0,67	+0,41	0,19	0

Tabel 4.1 Waterbeweging bij Moerdijk met Rijnafvoer van 2200 m³/s en een gemiddeld getijde

getijvolumes in miljoenen m³

GHW = gemiddelde hoogwaterstand in meters boven NAP

GLW = gemiddelde laagwaterstand in meters boven NAP

v_{max} = maximale stroomsnelheid (ebstroom) in m/s

v_{min} = minimale stroomsnelheid (vloedstroom) in m/s

5 Modellerings van de waterbeweging

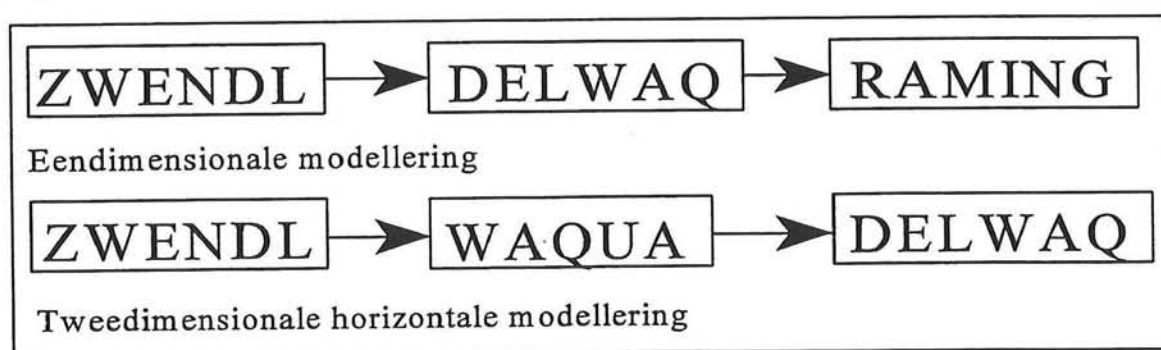
Voor het onderzoek naar de sedimentbeweging en de sedimentatie in de geul is gebruik gemaakt van modellen die beschikbaar waren binnen Rijkswaterstaat. Deze zijn ontwikkeld door o.a. het RIZA (Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling), het Waterloopkundig Laboratorium en het ingenieursbureau Svasek. Momenteel wordt er gewerkt aan een operationeel systeem dat tegelijkertijd de water- en sedimentbeweging simuleert (WAQUA in SIMONA). Voorlopig moet eerst de waterbeweging gesimuleerd worden en kan daarna met de resultaten de sedimentbeweging bepaald worden. De resultaten van de berekening van de waterbeweging moeten minstens 1 getijde beslaan. Deze resultaten kunnen dan achter elkaar gezet worden zodat een continue waterbeweging ontstaat.

5.1 Keuze Modellerings

Met de beschikbare modellen kan men op twee manieren de water- en sedimentbeweging modelleren. Dit kan met een ééndimensionale of met een tweedimensionale horizontale modellerings van de waterbeweging.

De ééndimensionale modellerings van de water- en sedimentbeweging gebeurt met de programma's ZWENDL, DELWAQ en RAMING (eventueel voor lange termijn EMPREL). Het programma EMPREL zal hierna niet verder behandeld worden.

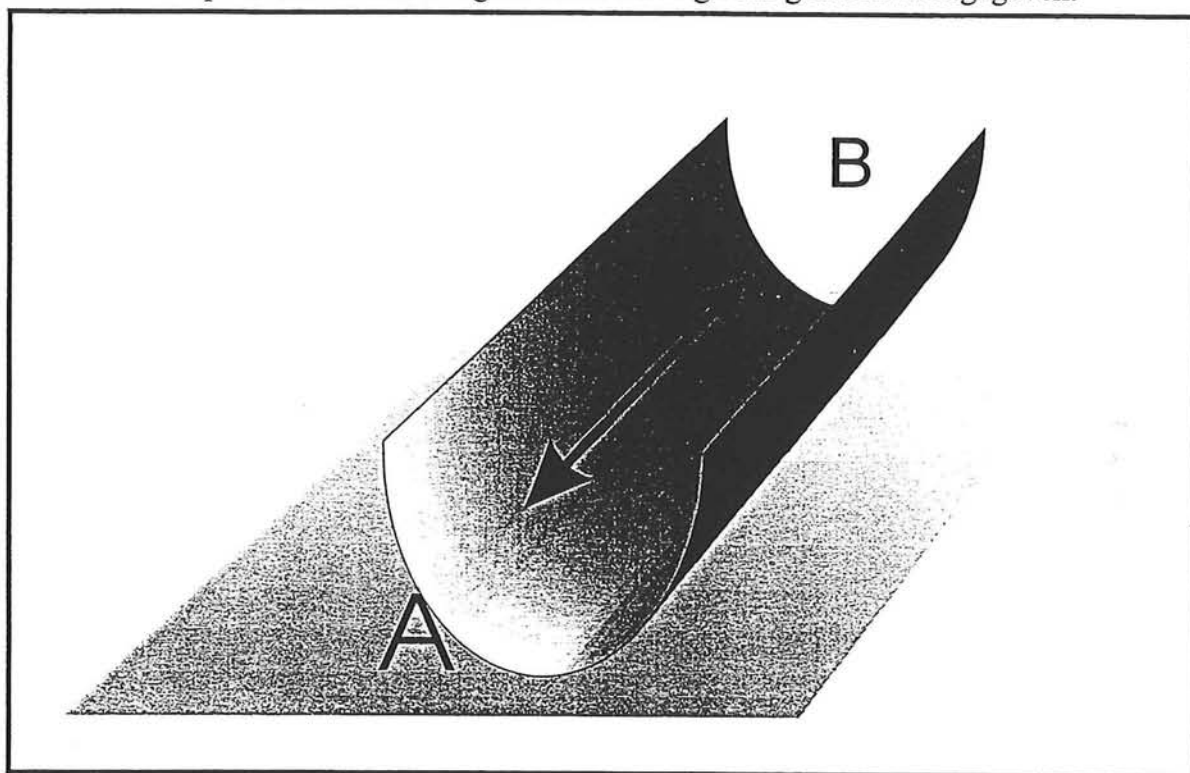
De tweedimensionale horizontale modellerings van de water- en sedimentbeweging gebeurt met de programma's WAQUA en DELWAQ (zie figuur 5.1). Hieronder zullen de programma's nader beschreven worden.



Figuur 5.1 Mogelijke modellerings

5.1.1 Ééndimensionale modellering

Een ééndimensionale modellering van water- en sedimentbeweging houdt in dat de waterstroming in een bepaald vak slechts in twee richtingen kan stromen (van punt A naar B en andersom). De stroomsnelheid is uniform over het dwarsprofiel ($u=Q/A$) en staat loodrecht hierop. In onderstaande figuur 5.2 is dit nog eens grafisch weergegeven.



Figuur 5.2 Ééndimensionale modellering

Bij de ééndimensionale modellering worden de programma's ZWENDL, DELWAQ en RAMING gebruikt. Hieronder zullen kort deze programma's besproken worden.

5.1.1.1 ZWENDL

De naam ZWENDL staat voor Zout en Waterbeweging Ééndimensionaal. ZWENDL kan met een ééndimensionale modellering van het gebied de waterbeweging simuleren. Het voordeel van een programma als ZWENDL is dat de berekening door de wijze van modelleren eenvoudig is in vergelijking tot programma's met een twee- of driedimensionale simulatie van de waterbeweging. De rekenduur is daarom kort en de geheugencapaciteit van het in te zetten rekentuig mag laag zijn. Door de eenvoudige simulatie van de waterbeweging kan het gebied waarvan de waterbeweging gesimuleerd wordt groot zijn. ZWENDL kan ook de zoutindringing en temperatuurseffekten simuleren. Voor dit programma is een modellering van het hele Noordelijk Delta bekken beschikbaar (zie figuur 5.4). Het Noordelijk Deltabekken is hierin geschematiseerd als een stelstel van 273 (rivier)vakken. Elk vak heeft een eigen profiel, lengte en hoogteligging. Daarnaast zitten er in de modellering ook speciale vakken zoals de Haringvlietsluizen. In ZWENDL

zit ook een procedure om het gedrag van de Haringvlietsluizen te simuleren. Deze modellering is geïjkt en er worden met deze modellering veel sommen gedraaid om toekomstig beleid te ondersteunen (MER-beheer Haringvlietsluizen, Open Beerdam). De tijdstap waarmee ZWENDL rekent is in te stellen en is tijdens dit onderzoek 5 minuten. Verdere fysische achtergrond van ZWENDL, zoals analytische achtergrond en numeriek schema zijn te vinden in bijlage II.1

De uitvoer uit ZWENDL kan gebruikt worden om met het programma DELWAQ de sedimentbeweging te berekenen.

5.1.1.2 DELWAQ

Het programma DELWAQ kan met behulp van de resultaten van de waterbeweging het sedimenttransport berekenen. DELWAQ heeft als invoer nodig de debieten en volumes op ieder tijdstip en op elk punt. De modellering die voor DELWAQ nodig is kan beperkt blijven tot het Hollandsch Diep, de Dordtsche Kil, de Amer en de Nieuwe Merwede. Dit zullen maximaal 20 vakken zijn.

DELWAQ is in staat de advectie-diffusie vergelijking zoals genoemd in paragraaf 7.4 op te lossen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een aantal subroutines die door de gebruiker toegevoegd zijn. Deze subroutines helpen om de verticale uitwisseling van sediment tussen suspensie en bodem te simuleren.

Het profiel van de verschillende vakken is voor de een ééndimensionale modellering niet verder gedefinieerd. Een verdere beschrijving van DELWAQ is te vinden in hoofdstuk 7.

De koppeling ZWENDL-DELWAQ heet het Regionaal Model.

5.1.1.3 RAMING

Het programma RAMING is een vervolg op DELWAQ. Een nadeel van DELWAQ is dat DELWAQ met segment-gemiddelden rekent, terwijl de sedimentatie en erosie niet uniform over het segment verdeeld zijn. Er treedt vaak sedimentatie op in de diepe geulen en erosie (bijvoorbeeld t.g.v. windgolven) bij de oevers. Met RAMING kan het ééndimensionale effect dat berekend is met de programma's ZWENDL en DELWAQ omgezet worden in tweedimensionale effecten, zoals winderosie aan oevers en sedimentatie in diepe geulen. Er vindt dan een herverdeling van de sedimentatie over het dwarsprofiel plaats.

Ook zit in RAMING een functie die ervoor zorgt dat bij sedimentatie of erosie de snelheid van deze processen in de tijd afneemt.

Door gebruik te maken van een ééndimensionale modellering van het gebied kan zeer goed een beeld verkregen worden van de sedimentstromen door verschillende riviertakken. Ook is dan duidelijk welke takken sedimenteren en welke takken eroderen. Dit kan voor een lange periode berekend worden. Nadeel van deze methode is dat op plaatsen met een wat ingewikkelder stroombeeld, deze methode te globaal is om een goed beeld te krijgen van de plaatselijke sedimentatie en erosie.

5.1.2 Tweedimensionale horizontale modellering

Bij een tweedimensionale horizontale simulering van water- en sedimentbeweging wordt een gebied opgedeeld in ongeveer gelijkvormige vakken. Een stroming kan daarbij door elke zijde van een vak gaan. Deze vakken zijn doorgaans veel kleiner dan de vakken waarmee bij een ééndimensionale modellering gerekend wordt. Hierdoor kan de water- en sedimentbeweging op sommige plaatsen nauwkeuriger gesimuleerd worden. Dit kan bijvoorbeeld zijn op plaatsen waar de stroming sterk gekromd is of op plaatsen waar op verschillende tijdstippen een wisselende, niet aan elkaar tegengestelde stroomrichting is. Een tweedimensionale horizontale modellering heeft een betere resolutie in horizontaal vlak.

Omdat de vakken waarmee bij een tweedimensionale horizontale modellering gerekend wordt veel kleiner zijn dan de vakken van een ééndimensionale schematisatie, zijn er meer vakken nodig om hetzelfde gebied te modelleren. Dit leidt tot langere rekentijd en een grotere uitvoer. Meestal wordt daarom eerst met een ééndimensionaal model (bijv. ZWENDL) de waterbeweging berekend. Uit de resultaten van deze berekening worden de randvoorwaarden voor de berekening met een tweedimensionaal horizontaal model gehaald. Zo kan de grootte van het gebied van de tweedimensionale horizontale modellering gereduceerd worden.

Bij een tweedimensionale horizontale modellering kan gebruik gemaakt worden van de programma's WAQUA en DELWAQ:

5.1.2.1 WAQUA:

Met het programma WAQUA kan de waterbeweging in het gebied tweedimensionaal horizontaal gesimuleerd worden. Er is een kromlijnige en een rechte lijnige schematisatie van het gebied beschikbaar (zie bijlage III.2). Voor de rechte lijnige schematisatie was bij het begin van het onderzoek ook al een koppeling met DELWAQ (een programma dat de sedimentbeweging simuleert) beschikbaar. Om de uitvoer te reduceren hoeft alleen maar met het oostelijk deel van deze rechte lijnige schematisatie gerekend te worden.

In dit onderzoek zou deze tweedimensionale horizontale modellering dan van toepassing zijn op de schematisatie van het Hollandsch Diep en delen van de Dordtsche Kil, Nieuwe Merwede en Amer (zie figuur 5.5). Deze modellering bestaat dan nog uit 17000 punten. De gridgrootte is 100 meter bij 100 meter. De bijbehorende tijdstap voor een stabiele berekening is dan 60 seconden. Een verdere uitleg van het programma WAQUA is te vinden in bijlage III.1.

5.1.2.2 DELWAQ

Het programma DELWAQ kan met behulp van de resultaten van de waterbeweging het sedimenttransport berekenen. De invoer voor een tweedimensionale horizontale berekening van het sedimenttransport komt uit de berekening met het programma WAQUA. Nodig voor een berekening met het programma DELWAQ zijn de debieten in x- en y-richting en het volume op ieder tijdstip, in ieder vak. De bodemschematisering waarmee DELWAQ bij een tweedimensionale horizontale modellering rekent, is dezelfde als die van WAQUA,

waarbij de punten die droogstaan niet meegenomen worden (zo'n 8000 punten). In de berekening worden daarna de overgebleven 9000 punten gebruikt.

DELWAQ is in staat de advectie-diffusie vergelijking zoals genoemd in paragraaf 7.4 op te lossen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een aantal subroutines om de verticale uitwisseling van sediment tussen suspensie en bodem te simuleren. Een verdere beschrijving van DELWAQ is te vinden in hoofdstuk 7.

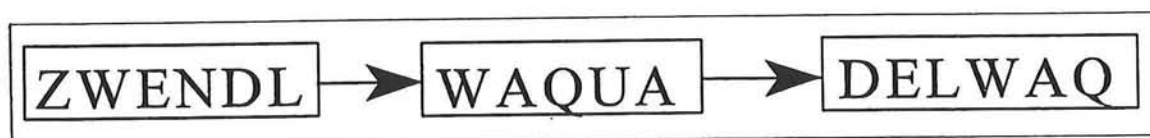
De koppeling WAQUA-DELWAQ heet SINODE (Slib in Noordelijk Deltabekken).

5.2 Afweging en keuze

De zeevaartgeul bij Moerdijk ligt op een punt waar de stroming zeer kan variëren (zie hoofdstuk 8). Vooral bij lage Rijnafvoeren is de rol van de Dordtsche Kil zeer groot in de stroming ter plaatse van de oversteek. Bij vloed stroomt het water vanuit de Dordtsche Kil het Hollandsch Diep op en bij eb juist in tegenovergestelde richting. Ook is ter plaatse van de oversteek de invloed terug te vinden van de Amer en de Nieuwe Merwede. In het noordelijk deel van het Hollandsch Diep wordt voornamelijk sediment afkomstig vanuit de Nieuwe Merwede getransporteerd en in het zuidelijk deel voornamelijk sediment vanuit de Amer.

Om deze verschijnselen goed te kunnen simuleren is een twee of driedimensionale modellering nodig. Aangezien een driedimensionale modellering nog niet beschikbaar was bij het begin van het onderzoek, is in de berekeningen gebruik gemaakt van een tweedimensionale horizontale modellering van water en sedimentbeweging.

Om de rekentijd en vooral de uitvoer te beperken van het programma dat de tweedimensionale horizontale waterbeweging simuleert, is gekozen voor een klein gebied om de tweedimensionale horizontale waterbeweging te simuleren. Met een één dimensionaal model moeten dan de randvoorwaarden voor dit gebied berekend worden. Zie figuur 5.3 voor het gekozen traject.



Figuur 5.3 Gekozen traject

De uitvoer uit ZWENDL is dus de invoer voor WAQUA en hetzelfde geldt voor WAQUA en DELWAQ. Hieronder zal een aantal aspecten van de tweedimensionale horizontale modellering van de waterbeweging verder beschreven worden.

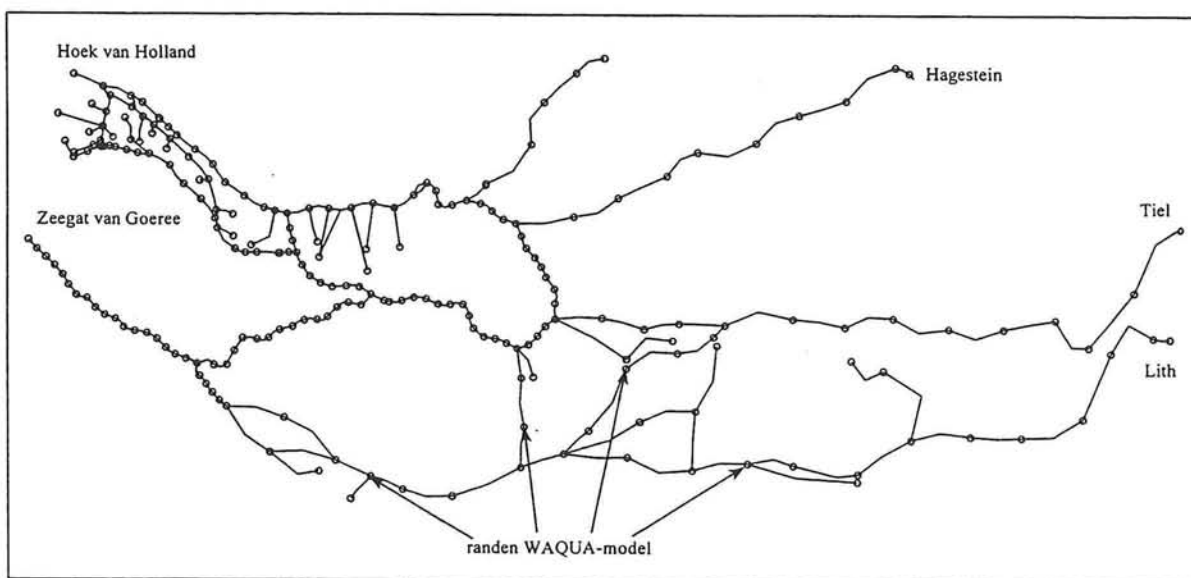
5.3 Randvoorwaarden ZWENDL

De water- en sedimentbeweging is voor de volgende Rijnafoeren gesimuleerd:

- een Rijnafoer van 2200 m³/s (50% overschrijdingskans)
- een Rijnafoer van 3500 m³/s (20% overschrijdingskans)
- een Rijnafoer van 5000 m³/s (10% overschrijdingskans)

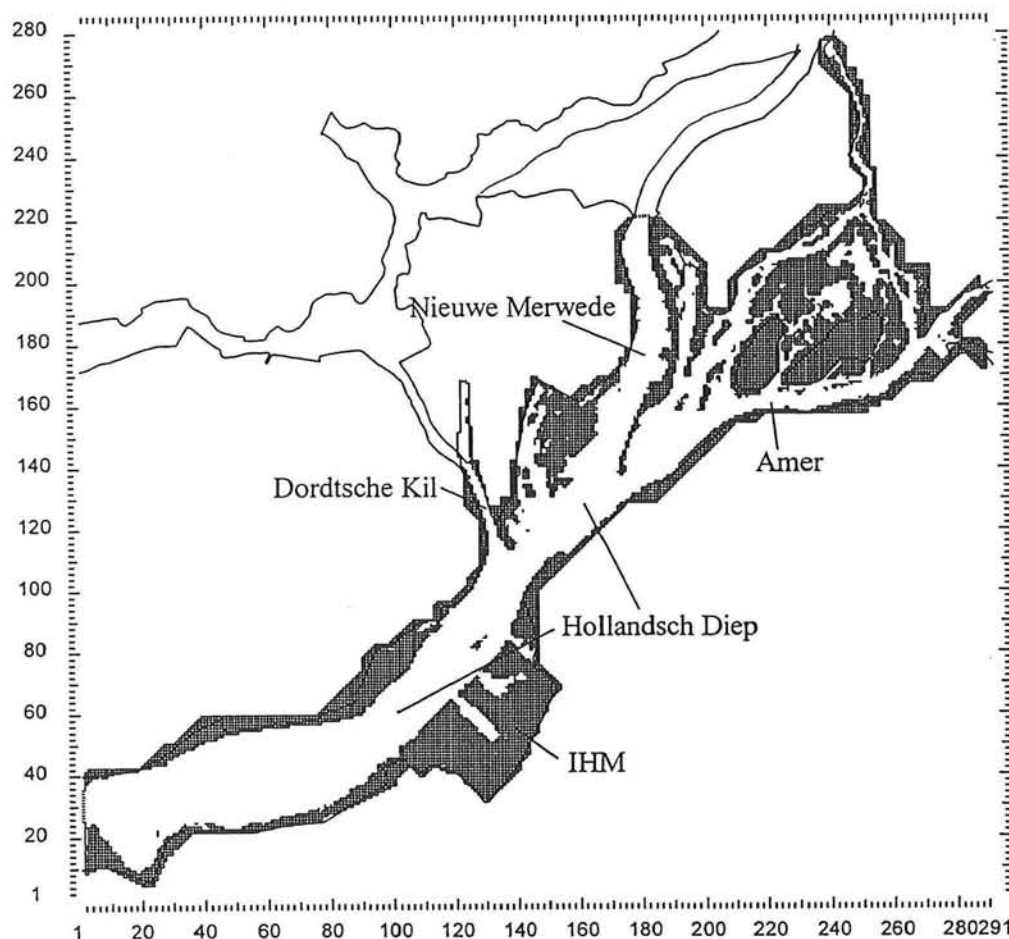
Bij elke Rijnafoer is een Maasafvoer gekozen met een onderschrijdingskans van 50% bij de gekozen Rijnafoer (zie tabel 5.1).

Voor ZWENDL is een schematisatie van het hele Noordelijk Deltabekken (NDB) beschikbaar (zie fig 5.4).



Figuur 5.4 Schematisatie gebied door ZWENDL

Om de uitvoer en rekestijd van het programma WAQUA te beperken, is gebruik gemaakt van de schematisatie die in figuur 5.5 te zien is.



Figuur 5.5 Schematisatie gebied door WAQUA

De randen van het model van het Noordelijk Deltabekken waarmee ZWENDL rekest liggen bovenstrooms bij Lith, Tiel en Hagestein en benedenstrooms bij Hoek van Holland en het Zeegat van Goeree. De bovenstroomse randvoorwaarden zijn de debieten op de Waal (bij Tiel), de Lek (Hagestein) en de Maas (Lith) (zie figuur 5.4). In tabel 5.1 staan de bovenstroomse randvoorwaarden voor de verschillende Rijnaftvoeren.

Rijnafvoer (Lobith) in m ³ /s	Maasafvoer (Lith) in m ³ /s	Lekafvoer (Ha- gestein) in m ³ /s	Waalafvoer (Tiel) in m ³ /s	opening Haring- vlietsluizen in m ²
2200	320	395	1485	200
3500	550	640	2275	844
HV2-min 3500	550	640	2275	1200 (eb+vl.)
5000	940	975	3315	1540

Tabel 5.1 Randvoorwaarden ZWENDL voor verschillende afvoeren.

De benedenstroomse randvoorwaarden zijn waterstanden. In het onderzoek is hiervoor het slotgemiddelde getij van 1991 bij Hoek van Holland en bij het Zeegat van Goeree gekozen (zie bijlage II.2).

5.4 Uitvoer ZWENDL en koppeling met WAQUA

In deze paragraaf wordt de koppeling tussen ZWENDL en WAQUA behandeld. De modellering van het gebied waarmee WAQUA rekent is gepresenteerd in figuur 5.5. De randen van dit model liggen bij het Hellegatsplein, bij 's Gravendeel (op de Dordtsche Kil), bij Kop van het Land (op de Nieuwe Merwede) en bij Keizersveer (op de Amer).

Als randvoorwaarden voor de berekeningen met WAQUA van de tweedimensionale horizontale waterbeweging zijn de waterstand bij de Haringvlietbrug (Hellegatsplein) en de rivierafvoeren op de Dordtsche Kil, op de Nieuwe Merwede (bij Kop van het Land) en op de Amer (bij Keizersveer) nodig. Deze randvoorwaarden moeten komen uit de berekeningen met ZWENDL. Voor de diverse Rijnafvoeren (2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s) zijn deze randvoorwaarden in bijlage III.3 gepresenteerd.

De inspeeltijd van ZWENDL is ongeveer 16 getijden. De gegevens op de bovengenoemde 4 punten van het zeventiende getij zijn daarom als invoer voor WAQUA gebruikt. Deze waarden zijn een aantal keer achter elkaar gezet om zo een contante cyclische beschrijving van de randvoorwaarden voor WAQUA te krijgen.

De randvoorwaarden moeten cyclisch zijn om de continuïteit te bewaren. Wanneer begin en eind van de randvoorwaarden niet op elkaar aansluiten bestaat de kans dat er in het model elk getijde massa bijkomt of weggaat. Dit kan leiden tot een te vol of een te leeg bekken. In voorgaande rapporten (Collard, 1992) is daarom aangeraden om de uitvoer van ZWENDL te analyseren tot een Fourier-reeks zodat de waterbeweging cyclisch zou worden. Tijdens het onderzoek bleek dit voor de gebruikte modellering niet nodig te zijn. Waarschijnlijk geldt dit wel voor kleinere modellen of bij een grotere getijbeweging. Bij zowel kleinere modellen als bij een grotere getijbeweging zal de mogelijk optredende fout groter zijn ten opzichte van het totale volume in het gebied dan bij de modellering die nu gebruikt is.

In het onderzoek zijn de randvoorwaarden voor WAQUA als tijdseries van waarden om de 5 minuten ingevoerd.

5.5 Uitvoer van WAQUA en koppeling met DELWAQ

Zoals al eerder vermeld gebruikt het programma DELWAQ dezelfde schematisatie van het gebied als WAQUA (figuur 5.5). DELWAQ heeft voor elke tijdstap voor elk segment de debieten in x- en y-richting door de zijvlakken en het volume nodig. Omdat de water- en sedimentbeweging nog niet tegelijkertijd berekend kunnen worden, moet eerst de hele waterbeweging berekend worden. Deze uitkomst kan daarna gebruikt worden als invoer voor de berekening van de sedimentbeweging.

De uitvoer uit WAQUA beslaat ongeveer zo'n 38 miljoen gegevens ($17000 \times 3 \times 745$). Deze uitvoer bevat ook gegevens van vakken waar geen water doorheen stroomt omdat ze te hoog liggen, maar die wel in de bodemschematisatie van WAQUA zijn opgenomen. Een koppelingsprogramma zorgt ervoor dat dit uitvoerbestand geconverteerd kan worden naar een aantal bestanden die bruikbaar zijn voor het programma DELWAQ. Bij deze conversie worden de hooggelegen vakken die gedurende het gehele getij droogstaan weggelaten. Dit levert een vermindering van het aantal vakken op: van 17000 vakken naar 9000. De grootte van de bestanden halveert daardoor ook. In het volgende hoofdstuk zal het gedrag van slib beschreven worden. In hoofdstuk 7 komt aan de orde hoe dit gedrag gesimuleerd kan worden om ermee te kunnen rekenen.

6 Beschrijving van het gedrag van sediment

6.1 Beschrijving van sediment

In het verleden zijn er veel metingen geweest naar concentraties en groottes van deeltjes in het Hollandsch Diep. De deeltjes zijn onder te verdelen in zand- en slibdeeltjes. Zanddeeltjes zijn groter dan 63 μm en slibdeeltjes zijn kleiner dan 63 μm . Met name het RIZA heeft veel metingen ter plaatse gedaan. Het Waterloopkundig Laboratorium heeft laboratoriumproeven met bodemonsters gedaan. Om realistische gegevens te krijgen moet eerst het 'gedrag' van sediment bekend zijn. Het gedrag van slib wordt omschreven in paragraaf 6.1.1 en zand komt in paragraaf 6.1.2 aan bod.

6.1.1 Beschrijving slib

De meeste gegevens over het gedrag van slib zijn afkomstig van Van Leussen, 1986 en het MKO (Minimalisering Kosten Onderhoudsbaggerwerk, RWS en R'dam, 1987). Slib is een naam voor alle cohesieve deeltjes die kleiner dan 63 μm zijn. Deze deeltjes zijn weer onder te verdelen in organische en anorganische stoffen met daarin een hoeveelheid micro-organismen. Het organische stofgedeelte is afkomstig van natuurlijke productie en huishoudelijke en industriële afvalwaterlozingen. Het gehalte organische stoffen is afkomstig uit huishoudens, industrie en de landbouw. Het anorganische gedeelte is ontstaan door erosieprocessen in het stroomgebied van de rivieren dan wel in zee.

De samenstelling van bodemonsters van slib bij Moerdijk is als volgt:

naam stof	omschrijving	% van gewicht
kwarts	kleine zanddeeltjes	30-35 %
chloriet	mineraal	8-10%
illiet	kleideeltjes met middelmatige grootte	20 %
kaolinit	grote kleideeltjes	5 %
feldspar	mineraal dat tot klei kan verweren	16-20%
calciet	kalk	7-8%
dolomiet	magnesiumverbinding	2-3%
org.stoffen		<1%

Tabel 6.1 Samenstelling bodemonsters slib bij Moerdijk
(waarden afkomstig uit Kuijper et al., 1990)

Wanneer slib door water getransporteerd wordt, gebeurt dit zelden door transport van individuele deeltjes, maar bijna altijd in de vorm van vlokken. Dit komt omdat slib cohesief is en dus aan elkaar gekleefde slibdeeltjes vlokken vormen. Met name illiet veroorzaakt flocculatie. Flocculatie wordt versterkt door de aanwezigheid van positieve

(metaal)ionen, opgelost in water. Dit is het geval in verontreinigde rivieren en in brak en zout water. De concentratie van slibdeeltjes heeft natuurlijk ook invloed op de mate van flocculatie.

De afzonderlijke deeltjes moeten ook met elkaar in aanraking kunnen komen. Dit kan gebeuren als gevolg van de Brownse beweging, stroomsnelheidsverschillen in het water en verschillende valsnelheden. Met name bij geringe turbulentie kunnen vlokken groeien. Bij sterke turbulentie zijn de vlokken kleiner. De vlogkrootte in situ, gemeten bij Moerdijk, varieerde bij "VIS"-metingen (Video-In-Situ-systeem, Verbeek, 1991) van 20 μm tot 200 μm met een gemiddelde van 64 μm . Uit deze grote variatie blijkt hoe divers de grootte van slibvlokken kan zijn.

6.1.2 Beschrijving zand

De deeltjes die groter zijn dan 63 μm zijn tijdens dit onderzoek gerekend tot de zandfractie. Ook slibvlokken kunnen groter zijn dan 63 μm maar deze korrels bestaan dan uit slibdeeltjes die aan elkaar gekleefd zitten (paragraaf 6.1.1). Zand flocculeert niet en wordt dus altijd in de vorm van aparte korrels getransporteerd.

De grootte van slibvlokken varieert in het gebied meer dan de grootte van zandkorrels. Ook de chemische samenstelling van zandkorrels is niet zo gevarieerd als de samenstelling van slibvlokken.

6.2 Erosie van sediment

Wanneer de stroomsnelheid van het langsstromende water groot genoeg is dan kan bodemmateriaal, oftewel sediment in de waterbodem, eroderen. Door de turbulentie en schuifspanning ter plaatse van de waterbodem komt sediment in suspensie. Bij dit proces komen de kleinere korrels (bijv. slibkorrels of kleine zandkorrels) door uitspoeling eerder in suspensie dan de grotere korrels/vlokken. Wanneer er te weinig kleine korrels in de bovenlaag van de bodem aanwezig zijn stopt dit proces omdat de grotere korrels/vlokken de kleinere korrels in de laag eronder tegen houden. Bij de optredende stroomsnelheden in het onderzochte gebied erodeert al het bodemmateriaal bijna tegelijkertijd.

6.3 Transport van sediment

Wanneer de korrel/vlok een kleine dichtheid/diameter heeft dan zal deze korrel/vlok gemakkelijker in suspensie komen. Korrels/vlokken met een grotere dichtheid en diameter (bijv. grote zandkorrels) blijven dicht bij de bodem en worden door middel van bodemtransport (bedload transport) verplaatst. Niet alleen zand, maar ook slib kan nabij de bodem getransporteerd worden. Wanneer het aantal vlokken in de buurt van de bodem groot is, bestaat de kans dat de dichtheid van water zo groot wordt, dat er een dunne meebewegende laag boven de bodem ontstaat (fluid mud). Deze laag kan aanzienlijk bijdragen tot het transport van slib. Bij metingen naar slib in het onderzoeksgebied is deze

laag niet aangetoond. Dit komt omdat de laag vaak erg dun is en dus slecht meetbaar is vanaf schepen. Het is dus mogelijk dat deze laag ook in het Hollandsch Diep aanwezig is.

Andere vormen van transport is het transport in suspensie van een homogeen verdeelde concentratie (suspended load transport) en het transport in de vorm van slibwolken. Vaak komt een combinatie van deze drie transportvormen voor.

6.4 Sedimentatie/Depositie van sediment

Sediment zakt bij een lage stroomsnelheid naar de bodem en zal uiteindelijk sedimenteren. In tegenstelling tot erosie zijn de verschillen in tijdstip en mate van sedimentatie wel sterk afhankelijk van de grootte en dichtheid van de vlokken/korrels.

De valsnelheid van een deeltje is van een aantal dingen afhankelijk. Allereerst is de valsnelheid afhankelijk van de korrelgrootte/flocculatiegraad. Grotere vlokken en korrels vallen vaak sneller. Daarnaast spelen ook de dichtheid van een vlok en de intensiteit van de turbulentie een rol. Korrels met een grote dichtheid (bijv. zandkorrels) zullen bij een hogere stroomsnelheid sedimenteren dan korrels met een lagere dichtheid. Ook de temperatuur is van invloed op de valsnelheid.

De vlokken die bij Moerdijk voorkomen, hebben een gemiddelde valsnelheid van 0,2 mm/s met als maximum 1,8 mm/s. Wanneer vlokken in de buurt van de bodem komen, vallen de zwakkere vlokken uiteen, als gevolg van turbulentie en grote snelheidsverschillen. De kleinere vlokken kunnen dan weer opgewerveld worden en in suspensie komen.

Na sedimentatie van de slibvlokken, waarbij ze vaak uiteenvallen, neemt als gevolg van sedimentatie van nieuwe vlokken de dichtheid van de bodemlaag toe. De samenstelling van de laag van slibvlokken/deeltjes wordt compacter. Daardoor neemt ook de sterkte (van de schuifweerstand) en het gasgehalte toe (als gevolg van de verdere omzetting van de organische bestanddelen). Dit proces heet consolidatie.

Een omgekeerd proces, de afname van de dichtheid, komt voor wanneer de lagen aan het oppervlak eroderen. De slibdeeltjes komen dan, als gevolg van de turbulentie en schuifspanningen in de onderste laag van het water, losser van elkaar te zitten en zullen op den duur weer in suspensie raken. Dit proces heet fluïdisatie.

Consolidatie en fluïdisatie zijn niet in de modellering van het sedimenttransport meegenomen omdat er nog te weinig over deze processen bekend is en deze processen niet goed kwantificeerbaar zijn.

6.5 Concentraties bij verschillende afvoeren

In het verleden zijn al veel metingen gedaan naar concentraties van zwevende stof in suspensie. Het probleem met het vergelijken van deze metingen is dat deze steeds op een andere manier en op een andere plaats zijn uitgevoerd. Voor het onderzoek is o.a. gebruik gemaakt van twee grootschalige meetcampagnes die door de meetdienst van Rijkswaterstaat zijn uitgevoerd. De oudste daarvan zijn de metingen die tussen 1973 en 1978 gedaan zijn. Dit zijn metingen die om de 2 of 3 kilometer in het gebied zijn genomen

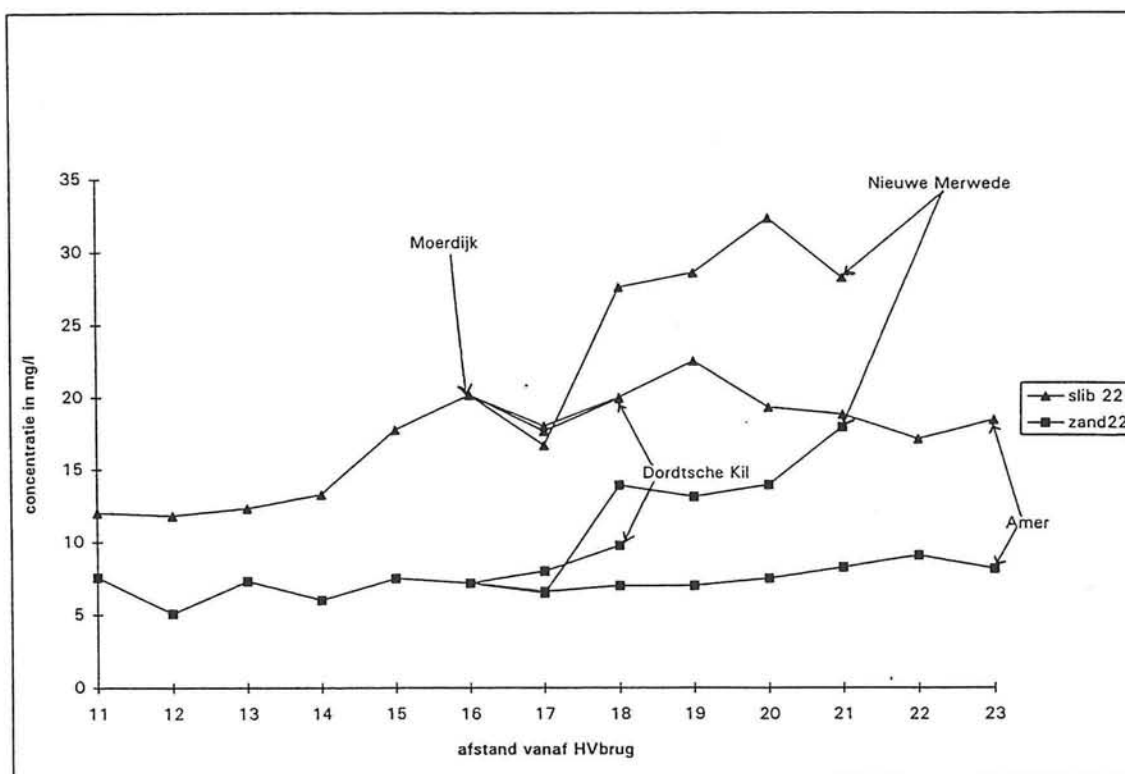
bij Rijnafvoeren variërend van 935 m³/s tot 5735 m³/s. Deze metingen betreffen de concentraties van zand en slib op 3 meter onder de waterspiegel.

De andere meetcampagne betreffen de metingen van de zwevende stof van 1980 tot 1990 op verschillende plaatsen in het gebied. Deze metingen zijn gedaan aan het wateroppervlak. Er is in deze periode ook bij minder verschillende Rijnafvoeren gemeten. Daarnaast waren er veel plaatselijke metingen (Verbeek et al., 1993/94a, Van Dreumel mondeling).

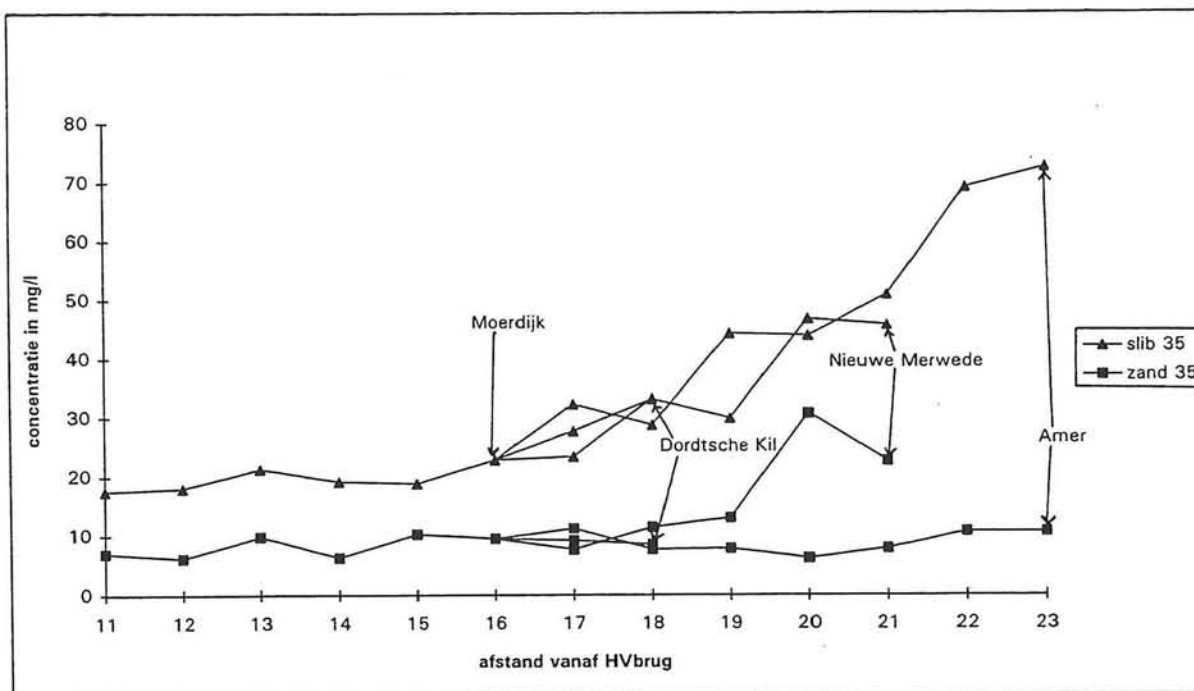
Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van de metingen in de periode '73-'78. Deze metingen waren het meest uitgebreid en ook het meest betrouwbaar. Een nadeel ervan is wel dat het oude metingen zijn. De metingen zijn in drie klassen verdeeld (zie tabel 6.1). In de figuren 6.1, 6.2 en 6.3 is voor elke klasse het verloop van de concentratie van zand en slib over het gebied weergegeven.

klasse	minimum	maximum	aantal waarden
2200 m ³ /s	1692 m ³ /s	2793 m ³ /s	12
3500 m ³ /s	2842 m ³ /s	4380 m ³ /s	6
5000 m ³ /s	4380 m ³ /s	5735 m ³ /s	5

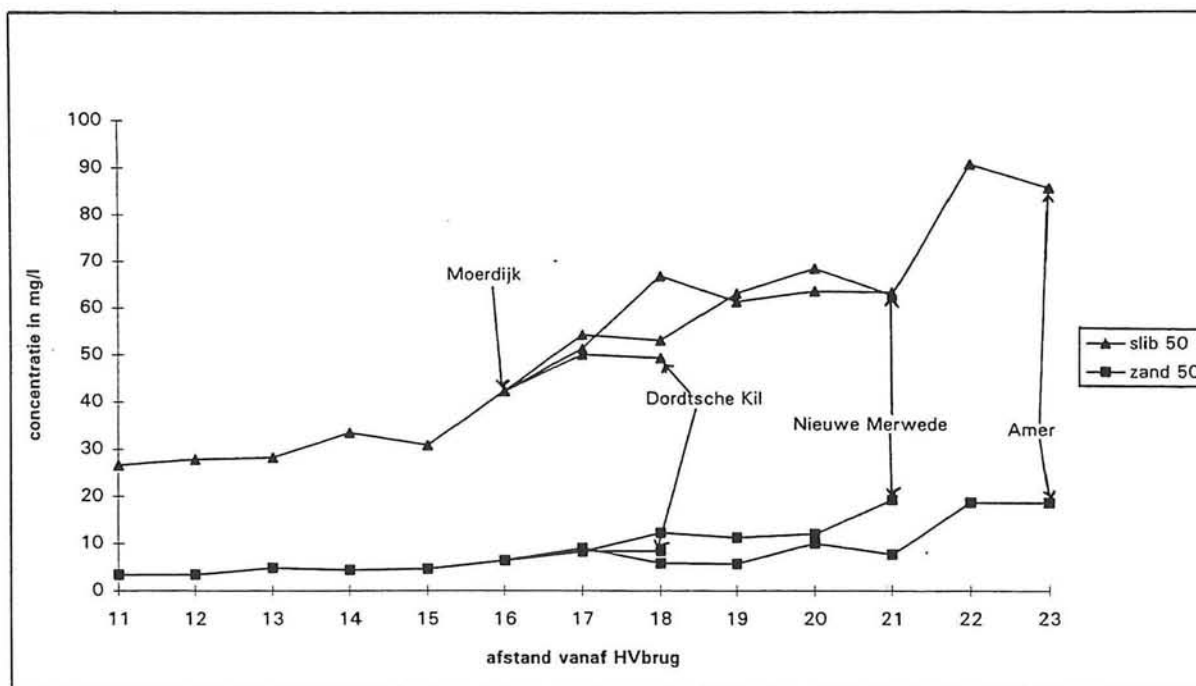
Tabel 6.2 Opdeling concentratie-metingen in klassen



Figuur 6.1 Concentratieverlopen bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s



Figuur 6.2 Concentratieverlopen bij een Rijnaafvoer van 3500 m³/s



Figuur 6.3 Concentratieverlopen bij een Rijnaafvoer van 5000 m³/s

6.6 Kwaliteit sediment en lokaties van vervuilingen

6.6.1 Kwaliteitsklassen sediment.

Om de vervuiling van sediment te classificeren is een onderverdeling in klassen voorgeschreven. Voor elke vervuilende stof zijn de grenswaarden van de concentratie voor elke klasse bij de wet bepaald. Dit kan betekenen dat een bepaalde hoeveelheid sediment klasse 3 voor de ene stof is en klasse 2 voor een andere stof. De classificatie van dat sediment wordt dan klasse 3.

Zowel zand als slib worden in 5 klassen onderverdeeld:

-klasse 0: sediment dat een natuurlijke vervuiling heeft

-klasse 1: licht vervuild sediment

-klasse 2: middelmatig vervuild sediment

-klasse 3: middelmatig tot zwaar vervuild sediment

-klasse 4: zwaar vervuild sediment

-Klassen 0 en 1 mogen op de Noordzee gestort worden of verwerkt worden in grondwerken.

-Klassen 2 en 3 moeten in slibdepots zoals de slufte (tot klasse 3) en Cromstrijen (gebiedseigen slib tot klasse 3) gestort worden

-Klasse 4 moet in de Papegaaiebek gestort worden. Dit is een waterdicht bassin.

Afhankelijk van de soort vervuiling wordt de ene lading gebaggerd sediment in het ene depot en de andere lading in het andere depot gestort. In bijlage IV zijn de stortlokaties en de vervuilingen uitgebreider beschreven.

Globaal kan men de vervuilende stoffen in een aantal categorieën indelen:

- zware metalen : kwik, cadmium, koper, nikkel, lood, zink, chroom, arseen
- PAK's=Polycyclische : verbrandingsproducten
aromatische koolwaterstoffen van auto's/industrie enz.
- PCB's=Polychloorbifenylen : giftige stoffen afkomstig uit de industrie
- OCB's=organo chloor : giftige stoffen vanuit
bestrijdingsmiddelen landbouw/industrie
- oliën

Al deze stoffen kunnen zich aan slibdeeltjes binden. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter het specifiek oppervlak. Dit is het oppervlak per gram stof (bij slib in orde 30 m²/g). Er zullen zich dus vooral aan kleine deeltjes veel verontreinigingen hechten.

Aan zand, of liever gezegd tussen de zanddeeltjes aan kleine slibdeeltjes, komen veel meer PAK's en oliën voor dan andere stoffen.

6.6.2 Lokatie van vervuilingen

De lokatie en de mate van vervuiling is in het Hollandsch Diep vrij nauwkeurig aan te geven. In het Nader Onderzoek Hollandsch Diep door Rijkswaterstaat en in samenwerking met de Rijksuniversiteit Utrecht is hier onderzoek naar gedaan (Hoefsloot et al., 1994 en Gunnik et al., 1993). Zoals al in paragraaf 4.2.2 vermeld is, heeft zich na 1970 sedimentatie voorgedaan in het gehele gebied. In het oostelijk deel van het Hollandsch Diep, ten oosten van Noordschans, was in het hele profiel sprake van sedimentatie. Dus zowel in de diepere delen (geulen) als in de ondiepere delen (oevers, platen). In het westelijk deel van het Hollandsch Diep vond voornamelijk in de diepere geulen sedimentatie plaats.

Er is ook een verschil in korrelgroottes van het bodemmateriaal. In de ondiepere delen van het Hollandsch Diep bestaat het bodemmateriaal voor een groot gedeelte uit zand. Het bodemmateriaal in de diepere delen in het Hollandsch diep heeft gemiddeld een kleinere diameter dan in de ondiepere delen. Dit is voornamelijk slib. Dit geldt overigens niet voor de oversteek over het Hollandsch Diep.

Het feit dat in ondiepe gedeeltes grover materiaal wordt gevonden dan in de diepere gedeeltes kan worden verklaard uit de secundaire waterbeweging. In ondiepere gedeeltes vindt namelijk erosie plaats als gevolg van windgolven. Dit zorgt ervoor dat alleen de grotere deeltjes kunnen blijven liggen en dat de kleine deeltjes naar diepere delen worden getransporteerd.

De kwaliteit van het sediment hangt af van de mogelijkheid om verontreinigingen te

kunnen binden. Verontreinigingen kunnen zich beter binden aan kleinere deeltjes zoals slib dan aan grotere deeltjes zoals zand. Ook de bron maakt verschil in de mate en soort vervuiling. Via de Dordtsche Kil, de Nieuwe Merwede en de Amer wordt sediment naar het Hollandsch Diep aangevoerd. Het sediment aangevoerd door de Maas is anders van samenstelling en heeft vaak een ander soort vervuiling dan sediment dat aangevoerd wordt door de Rijn. Meestal is het sediment uit de Maas sterker vervuild dan dat uit de Rijn.

De grootste vervuiling van sediment is terug te vinden bij sediment dat voor 1980 is afgezet. Sediment dat na 1984 is afgezet is over het algemeen schoner dan het sediment dat voor 1984 is afgezet. In diepe geulen is het sediment dat na 1978 is afgezet relatief schoon (lager dan klasse 4). Op sommige plaatsen in het gebied ligt nog sediment dat voor 1978 is gesedimenteerd aan het oppervlak van de bodem en hier is dus klasse 4 sediment aan het bodemoppervlak te vinden. Dit is bijvoorbeeld het geval in de zeevaartgeul waar steeds de nieuwe laag sediment wordt weggebaggerd. In 1994 was 7 % van het gebaggerd sediment uit de zeevaartgeul klasse 4. De overige 93 % was klasse 3.

In de ondiepe gedeelten (vooroevers) in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep is veel sediment te vinden dat vervuild is met PCB's, OCB's en cadmium (klasse 4). In het westelijk deel is in de ondiepe gedeelten veel zand te vinden met een klasse 3 vervuilingen aan PAK's.

6.7 Mogelijke behandelingen van vervuild gebaggerd sediment:

- Reiniging: Dit is goed mogelijk wanneer het bodemmateriaal slechts met enkele stoffen vervuild is. Dit is vaak het geval voor bodemvervuiling op land. Vervuild sediment dat door een rivier getransporteerd is en daarna afgezet is bevat echter vaak veel vervuilende stoffen. Dit komt omdat de afstand tussen vervuiliingsbron en sedimentatieplaats vaak groot is. De verschillende vervuilingen mixen dan goed door elkaar.
Voor zand is reiniging misschien wel mogelijk omdat het aantal vervuilende stoffen relatief laag is. Er mogen dan geen (of niet teveel) slibvlokken in het gebaggerde materiaal zitten. Deze blijven bij het centrifugeren of andere scheidingstechnieken tussen de zandkorrels zitten.
- Storten: Dit is voorlopig nog de goedkoopste oplossing voor het gebaggerde sediment. De huidige stortlocaties beginnen snel vol te raken en aanleg van nieuwe locaties is moeilijk uit het oogpunt van milieu-eisen.
- Verwerken: Omdat reinigen duur is en storten een steeds groter probleem wordt, wordt er binnen Rijkswaterstaat gestudeerd op alternatieven. Eén van deze alternatieven is het verwerken van gebaggerd specie via een sinterproces tot een soort basalt. Voorwaarde hiervoor is dat de verontreinigingen geïmmobiliseerd worden. Dat wil zeggen dat ze na verwerking niet meer uit het basalt kunnen ontsnappen (zie RWS, 1995a).

Het Ministerie van Verkeer en Waterstaat wil als doelstelling 20 % van het gebaggerd materiaal tot 2010 hergebruiken (bron Houweling, 1995).

7 Modelleringsgedrag sediment

In dit hoofdstuk wordt de numerieke modellering van het gedrag van sediment besproken. Allereerst komt een aantal parameters aan bod die indirect iets met de modellering van het gedrag van sediment te maken hebben. Na de uitleg over het aantal fracties (7.1) worden de fysische begin- en randvoorwaarden zoals genoemd in paragraaf 3.3 verder toegelicht. Dit zijn de gebruikte Rijnaftoeren (7.2.1), de gebruikte concentraties (7.2.2), de bodemsamenstelling (7.2.3), de dichtheid van het water (7.2.4) en de windinvloeden (7.2.5).

In paragraaf 7.3 komen de parameters voor de discretisatie in ruimte en tijd aan bod. Dit zijn: de modellering van het gebied (7.3.1), de tijdsparameters (7.3.2) en de gebruikte dispersie (7.3.3). Paragraaf 7.4 gaat over de fysische en numerieke modellering en in paragraaf 7.5 worden de gebruikte parameters in deze modellering beschreven. De evaluatie hoe tot deze parameters is gekomen is ook beschreven in paragraaf 7.5. In 7.5.1 volgen de criteria, in 7.5.2 de parameters voor de sedimentatie en in 7.5.3 de parameters voor de erosie.

7.1 Aantal fracties in modellering

In het verleden is veel gerekend met slechts één fractie. Dit had als voordeel dat de modellering van het sedimentatie- en erosieproces relatief gemakkelijk was. Een nadeel van deze wijze van modellering was dat in gebieden waar sedimentatie optreedt, de concentratie op den duur naar nul gaat. Bij een bepaalde bodemschuifspanning vindt er altijd sedimentatie plaats, waardoor op den duur al het meegevoerde materiaal sedimenteert. Er ontstaat dan een evenwichtstoestand met een sedimentsconcentratie gelijk aan nul. Dit komt niet overeen met de werkelijkheid waarin de suspensie bestaat uit inhomogeen materiaal.

In de modellering is daarom met meerdere fracties gewerkt. Voor elke fractie zijn dan apart sedimentatieparameters in te stellen. Dit heeft als voordeel dat wanneer de ene fractie volledig is gesedimenteerd, de concentratie in de suspensie niet nul hoeft te zijn. Het is namelijk mogelijk dat de overige fracties helemaal niet sedimenteren bij de optredende stroomsnelheid. In de modellering zijn daarom de volgende fracties gebruikt: een zandfractie, een grof slibfractie en een fijn slibfractie. Met drie fracties kan ook beter bepaald worden welke fractie op welke plaats terechtkomt (Kuiper et al., 1993).

Ook erosie zit in de modellering. Zoals in paragraaf 6.2 al is beschreven eroderen niet alle stoffen tegelijkertijd. De korrels en vlokken met een kleine dichtheid en kleine diameter komen eroderen eerder dan grotere korrels/vlokken. Dit proces heet uitspoeling. Op de plaatsen waar in het model erosie optreedt zijn de stroomsnelheden echter meestal zo hoog dat al het bodemmateriaal bijna tegelijkertijd eroderen. Daarom is er voor de simulatie van erosie van bodemmateriaal in het model geen verschil gemaakt tussen de verschillende fracties en hebben alle fracties dezelfde erosieparameters.

Een verdere beschrijving van de modellering van sedimentatie en erosie en de gebruikte parameters in deze modellering is te vinden in paragraaf 7.4.

7.2 Toelichting fysische begin- en randvoorwaarden

7.2.1 Gebruikte Rijnafvoeren

In totaal zijn er 170 berekeningen uitgevoerd om de juiste combinatie van factoren te vinden, die tot de resultaten in de volgende hoofdstukken hebben geleid. Tijdens het onderzoek zijn drie verschillende Rijnafvoeren bekeken. De meeste berekeningen (120) zijn gedaan met de waterbeweging met een gemiddelde Rijnafvoer ($2200 \text{ m}^3/\text{s}$). Verder zijn berekeningen uitgevoerd met twee hoge Rijnafvoeren ($3500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $5000 \text{ m}^3/\text{s}$), elk ongeveer 25 berekeningen. Hiervan waren resp. 93, 25 en 21 berekeningen geschikt voor de evaluatie. De overigen bleken achteraf te onnauwkeurig om mee te nemen in de evaluatie.

Verdere uitleg over de gebruikte Rijnafvoeren is te vinden in paragraaf 5.3.

Tijdens het onderzoek is geen situatie bekeken die past bij een lage Rijnafvoer ($< 2200 \text{ m}^3/\text{s}$). Bij een lage Rijnafvoer wordt namelijk weinig sediment getransporteerd. Deze situatie heeft dus nauwelijks invloed op de sedimentbeweging in het gebied en de sedimentatie in de zeevaartgeul.

De meeste berekeningen zijn gedaan met een stroombeeld dat past bij een Rijnafvoer van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze situatie komt regelmatig voor en eerdere onderzoeken hebben aangetoond dat het gemiddeld stroombeeld bepalend is voor de sedimentatie in de zeevaartgeul. Bij hogere Rijnafvoeren wordt per tijdseenheid wel meer sediment in het gebied afgezet maar over een veel kortere periode. De hoeveelheid sediment, die bij een hoge afvoer in de geul wordt afgezet draagt daardoor minder bij tot de werkelijke sedimentatie dan de hoeveelheid die bij een gemiddelde afvoer wordt afgezet.

Een andere reden dat er meer berekeningen met een gemiddelde afvoer zijn gedaan is, dat het stroombeeld bij een gemiddelde Rijnafvoer veel complexer is dan bij een hoge Rijnafvoer. Bij een hoge Rijnafvoer is de stroming hoofdzakelijk oost-west. Bij een gemiddelde Rijnafvoer heeft de Dordtsche Kil een veel grotere invloed op de water- en sedimentbeweging. Daarom is het gedrag van het sediment bij hoge afvoeren veel eenvoudiger te bepalen dan bij een gemiddelde Rijnafvoer (zie paragraaf 7.5).

Bij elke Rijnafvoer is een Maasafvoer gekozen met een onderschrijdingskans van 50 % bij de gekozen Rijnafvoer.

7.2.2 Begin- en randvoorwaarden concentraties.

In de modellering is als beginvoorwaarde de concentratie in het hele gebied op nul gesteld. Dit is gedaan omdat bij de eerste berekeningen niet bekend was hoe het sediment zich over het gebied zou verspreiden. Om latere berekeningen met de eerste berekeningen te kunnen vergelijken is als beginvoorwaarde ook bij deze berekeningen de concentratie in het gebied op nul gesteld. Door de concentratie op nul te stellen wordt alleen de snelheid waarmee het model inspeelt beïnvloedt en niet het eindresultaat.

In paragraaf 6.5 is beschreven welke verschillende metingen van concentraties van zwevende stof beschikbaar waren. Gekozen is om de metingen van '73-'78 te gebruiken voor dit onderzoek. Deze waarden zijn de meest bruikbare gegevens die ter beschikking waren, omdat deze waarden het beste de gemiddelde concentraties over de diepte benaderen (metingen van concentratie op 3 meter beneden de waterspiegel). Daarnaast zijn tijdens deze meetcampagnes de meeste metingen verricht en zijn de zand- en slibfractie apart gemeten.

Deze metingen zijn als uitgangspunt genomen voor de op te leggen concentraties van de sedimentfracties op de randen van het model. De randen van het rekenmodel kwamen vrij goed overeen met meetpunten van concentraties. Voor de rand op de Dordtsche Kil is meetpunt 53 (km-raai 985) genomen, voor de rand bij Kop van het Land is meetpunt 47 (km-raai 971) genomen en voor de rand bij Keizersveer is meetpunt 23 genomen. Op de rand bij de Haringvlietbrug is een concentratie van nul opgelegd. Bij eerdere berekeningen zorgde een hogere concentratie op deze rand voor instabiliteit. Bij één som is er wel een concentratie opgelegd. Dit zorgde niet voor instabiliteit maar leverde geen verschil met andere sommen. Dit komt omdat de concentratie bij de Haringvlietbrug vrij laag is en de overheersende stroom westwaards gericht is: dit is het model uit.

Voor de drie verschillende Rijnafoeren (2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s) zijn ook drie verschillende concentraties op de randen opgelegd. Bij een Rijnafoer van 2200 m³/s is de gemiddelde concentratie van metingen tussen 1693 m³/s en 2793 m³/s opgelegd (12 metingen). Bij een Rijnafoer van 3500 m³/s is de gemiddelde concentratie van 2842 m³/s tot 4380 m³/s (6 metingen) opgelegd en bij een Rijnafoer van 5000 m³/s is de gemiddelde concentratie van 4380 m³/s tot 5735 m³/s (5 metingen) opgelegd.

De overige metingen (meetcampagne '80-'90, Verbeek 1991, Van Dreumel mondeling) en de metingen van omliggende plaatsen zijn gebruikt om de metingen uit de periode '73-'78 bij te stellen en om de gemeten concentratie van de slibfractie te vertalen in een grof slibfractie en een fijn slibfractie.

Te grote uitschieters in de metingen zijn buiten de berekening gehouden. Bij een afvoer van 2200 m³/s was de gemiddelde concentratie van de slibfractie te laag. De grof slibfractie is daarom gelijk aan de gemiddelde slibfractie genomen en voor de fijn slibfractie is de helft van de slibfractie genomen. Bij Rijnafoeren van 3500 m³/s en 5000 m³/s is de grof slibfractie gelijk genomen aan de gemeten slibfractie en is de fijn slibfractie resp. 1/3 en 1/4 van deze concentratie genomen. Dit volgt uit analyse van de overige metingen. De concentraties van de zandfractie zijn niet gewijzigd en komen overeen met de waarden uit de metingen van '73-'78.

De concentraties zijn constant genomen in de tijd en de randvoorwaarden van concentraties variëren dus niet gedurende het getij. Er nog weinig bekend over de concentratieverdeling van slib over het getij. Bij hoge afvoeren is hier wel onderzoek naar gedaan (Verbeek, 1993 en 1994). Een mogelijkheid is om het zandtransport te koppelen aan de stroomsnelheid.

In tabel 7.1 volgt een overzicht van de opgelegde concentraties

Rijnaafvoer	2200 m ³ /s			3500 m ³ /s			5000 m ³ /s		
fractie	zand	grsl	fnsl	zand	grsl	fnsl	zand	grsl	fnsl
Dordtsche Kil	10	20	10	8	33	15	8	50	12
Nieuwe Merwede	17	28	15	22	45	10	20	63	15
Amer	10	20	10	10	72	20	21	116	30
Haringvlietbrug	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 7.1 Randvoorwaarden concentraties in mg/l voor Rijnafvoeren 2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s en een daarbij behorende Maasafvoer (zie paragraaf 7.2.1)

zand : zandfractie

grsl : grof slibfractie

fnsl : fijn slibfractie

Voor de berekening van de HV2-min variant zijn, bij gebrek aan reële waarden, de concentraties bij een Rijnafvoer van 3500 m³/s genomen.

Ook is de optie om lozingen in de modellering aan te brengen gedurende het onderzoek niet gebruikt. In werkelijkheid gebeurt dit wel bij de bagger- en stortlocatie Cromstrijen (zie bijlage IV). De gegevens hierover ontbraken en zijn in de tijd zeer variërend. Bovendien is dit proces plaatsgebonden en heeft dit weinig invloed op de sedimentatie nabij de zeevaartgeul.

7.2.3 Bodemsamenstelling

De bodemsamenstelling zoals gebruikt in de modellering bestaat uit een laag waarin de drie fracties (zand, grof slib en fijn slib) zich bevinden. Deze laag is bij het begin van de berekening overal 10 centimeter dik. Afhankelijk van sedimentatie of erosie wordt deze laag gedurende de berekening dikker of dunner. Op plaatsen waar geen erosie kan optreden is geen bodemlaag aangenomen.

De laag heeft bij het begin van de berekening overal dezelfde samenstelling. Hierdoor is het eenvoudiger om de resultaten achteraf over het hele gebied te beoordelen.

De samenstelling is als volgt:

zand	: 20%
grof slib	: 60%
fijn slib	: 20%

Dit komt overeen met de gemiddelde samenstelling van de bodem in het gebied. Bij nader inzien zou het beter zijn geweest de samenstelling op plaatsen waar erosie optreedt aan te passen aan de werkelijke bodemsamenstelling ter plekke.

De dichtheid van de droge stof in de bodemlaag die voor alle fracties gebruikt is om de dikte van de bodemlaag te bepalen is 400 kg/m^3 (dichtheid van 15%).

7.2.4 Dichtheid van het water

In alle berekeningen is voor de dichtheid van water 1005 kg/m^3 aangenomen. Het komt overeen met een gemiddelde concentratie van 80 mg/l .

Het programma DELWAQ lost de advectie-diffusie vergelijking op zoals die omschreven is in paragraaf 7.4. Omdat de oplossingsmethode van DELWAQ (Lax-Wendroff) anders is als de oplossingsmethode die WAQUA (ADI, zie bijlage III) gebruikt, kunnen er verschillen ontstaan tussen de resultaten uit beide programma's. Ook kunnen er kleine instabiliteiten ontstaan in de berekening met DELWAQ. DELWAQ vangt deze verschillen op door de dichtheid aan te passen.

Wanneer er echter instabiliteiten optreden dan zal er teveel massa in- of uitgaan. Dan neemt de dichtheid te veel toe of af. Om de berekening op instabiliteiten te controleren zijn daarom de grenzen van de dichtheid op 90 en 110 % van de beginwaarde gesteld (dichtheid moet dus tussen 904.5 kg/m^3 en 1105.5 kg/m^3 liggen). Bij alle uitgevoerde berekeningen is deze grens in enkele segmenten overschreden. Deze segmenten lagen in de ondiepe delen van het model zoals de Dordtsche en Brabantse Biesbosch en de instabiliteiten bleven lokaal. Er is daarom niet getracht deze instabiliteiten op te heffen.

7.2.5 Windinvloeden

In de modellering is de mogelijkheid aanwezig om windinvloeden te simuleren. Deze mogelijkheid, die zowel in ZWENDL als in WAQUA mogelijk was, heeft invloed op de stroming en op waterstanden. Ook zorgt wind voor windgolven, die in ondiepe gedeelten tot erosie kunnen leiden. In de berekeningen is geen gebruik gemaakt van windinvloeden. Reden hiervoor is dat de windinvloed onder normale omstandigheden te weinig invloed heeft, zodat de gemiddelde stroming zonder windinvloeden niet veel verschilt met de gemiddelde stroming met windinvloeden. Over het proces van erosie door windinvloeden was te weinig bekend om dit goed te kunnen modelleren.

7.3 Parameters voor de discretisatie in ruimte en tijd

7.3.1 Modellerings van het gebied

In de berekening met DELWAQ is de schematisatie van het gebied dezelfde als in de berekening met WAQUA (zie figuur 5.5). Dit komt doordat DELWAQ de waterbeweging uit de berekening met WAQUA voor zijn eigen berekening gebruikt. Een andere modellering heeft een andere waterbeweging tot gevolg. In bijlage III.1 is de modellering die WAQUA gebruikt omschreven.

Voor deze modellering is het gebied opgedeeld in vierkanten van 100 bij 100 meter. Zo is een vierkantenrooster ontstaan. Voor elk vak is de diepte en de ruwheid op te geven. Deze modellering bevat een gedeelte van het model van de hele zuidrand van het Noordelijk Deltabekken dat ook het Haringvliet en het Spui omvat (zie bijlage III.2). Een roosterafstand van 100 meter zorgt wel voor een vereenvoudiging van de bodem in een gebied waar de bodemligging soms wel elke 10 meter kan verschillen.

De zeevaartgeul heeft slechts een vaarbreedte van 150 meter en is met taluds meegerekend 250 à 300 meter breed. De gebruikte gridgrootte is 100 meter, waardoor het vrij moeilijk is om de geul goed te modelleren. Bij aanvang van het onderzoek was dit één van mijn eerste aandachtspunten. De geul ligt in lengterichting redelijk gelijk met het rooster en was duidelijk waarneembaar in verschillende diepteprofielen. Een kleinere gridgrootte zou leiden tot (nog) grotere uitvoerbestanden en ik wilde eerst de mij geleverde modellering goed krijgen. Het leek mij daarom toch het proberen waard om de gridgrootte zo te laten.

Halverwege het onderzoek is het gelukt om gegevens die afkomstig zijn uit het GIS-pakket (Geografisch Informatiesysteem) ARC-INFO om te zetten in een bodemschematisatie voor WAQUA. Hierdoor is de uiteindelijke bodemschematisatie in de berekeningen gebaseerd op de bodemligging in 1993. Dit is vanwege de rekencapaciteit alleen gebeurd voor de Dordtsche Kil en het Hollandsch Diep tussen de Moerdijkbruggen en Klundert. De overige delen zijn niet aangepast en zijn gebaseerd op de bodemligging van 1987.

Deze modellering is ten opzichte van de werkelijke ligging over 30 graden gedraaid. Hierdoor komt een groot gedeelte van het Haringvliet, het Hollandsch Diep en de Nieuwe

Merwede recht in het model te liggen. De oplossingsmethode waarvan WAQUA gebruik maakt (ADI, zie bijlage III) is namelijk nauwkeuriger als de stroming die door de vakken gaat voornamelijk in één richting plaatsvindt. Dit komt omdat de ADI-methode eerst de beweging in de x-richting bepaalt en daarna in de y-richting.

Om dezelfde reden is bij de modellering van de Dordtsche Kil een noodgreep toegepast. De Dordtsche Kil is een smalle riviertak, waar hoge stroomsnelheden optreden. Daardoor is de uitwisseling per tijdstap tussen de vakken groot. Bij een modellering die overeen zou komen met de geografische ligging van de Dordtsche Kil zou deze rivier schuin in het rooster komen te liggen. Dit geeft veel onnauwkeurigheden en kan tot onwerkelijke situaties leiden. Daarom is het bovenste gedeelte van de Dordtsche Kil in de modellering verschoven zodat dit een rechte tak is geworden. Deze modellering was zelfs nog niet voldoende om alle instabiliteiten uit het model te halen. Op het punt waar de rechte tak over ging in de oorspronkelijke modellering van de Dordtsche Kil moest het profiel nog verbreed en verdiept worden om de stabiliteit te behouden.

De uitvoer van WAQUA moet met behulp van koppelingsprogramma's geschikt gemaakt worden voor de berekening met DELWAQ. Zoals in paragraaf 5.5 al vermeld is, zorgen deze koppelingsprogramma's ervoor dat de vakken die gedurende de rekenperiode droogstaan en dus niet van belang zijn, weggelaten worden. Hierdoor wordt het aantal vakken van 17000 teruggebracht tot 9000.

Omdat DELWAQ geen gebruik maakt van de ADI-methode, maar van het expliciete schema (Lax-Wendroff, zie paragraaf 7.4), moeten er een aantal maatregelen genomen worden om de stabiliteit te waarborgen. Een methode om dit te bewerkstelligen is door een eis te stellen aan de uitwisseling van volume per tijdstap. Als criterium tijdens het onderzoek is gesteld dat het uitgewisselde volume niet meer dan 50% van het totale volume in het vak mag zijn. Wanneer dit niet het geval is wordt het totale volume van het vak vermeerderd. Het vak wordt dan dus dieper en de concentratie minder. Omdat deze aanpassing maar bij enkele vakken gebeurt, levert dit geen problemen op voor de continuïteit.

Met deze koppelingsprogramma's kunnen ook vakken samengenomen worden of uit de modellering gehaald worden. In eerdere onderzoeken (Collard, 1992) is het laatste gebeurd met de vakken die op de randen lagen, omdat deze vakken instabiliteiten opleverden. Dit is echter niet nodig geweest bij dit onderzoek.

7.3.2 Tijdstap en inspeeltijd

De tijdstap die in de berekening met DELWAQ gebruikt is, bedraagt 1 minuut. Dit komt overeen met de tijdstap die bij de berekening met WAQUA gebruikt is en de tijdstap die in de uitvoer van WAQUA gebruikt is. Tijdens het onderzoek is niet gekeken naar de invloed van de tijdsstap. Een grotere tijdsstap zal leiden tot instabiliteit of onnauwkeurigheid, een kleinere tot nog langere rekentijden.

Er is wel gekeken naar de invloed van de inspeeltijd. Om de resultaten van de

berekeningen te kunnen gebruiken en een goed beeld van de processen te kunnen krijgen, is het nodig dat het model ingespeeld is. Dit is eenvoudig te controleren door de resultaten van opeenvolgende getijcycli met elkaar te vergelijken. De resultaten na 0, 2, 4, 6, 12, en 24 dagen inspeeltijd zijn met elkaar vergeleken voor verschillende combinaties van randvoorwaarden (concentraties), afvoeren en parameters zoals valsnelheden en kritische stroomsnelheden. Als criterium is gesteld dat de verschillen tussen twee opeenvolgende getijden niet meer dan 5 % van de toename tussen die getijden mochten bedragen.

Na 6 dagen (11 getijden) was dit voor alle proeven het geval. De resultaten van de berekeningen zijn dus de resultaten van het 12e getij (van 5 dgn, 16u, 35 min tot 6 dgn, 5 u, 0 min). Bij een eerder getij is het model nog niet voldoende ingespeeld, bij een later getij neemt de rekentijd toe en is de uitkomst hetzelfde.

7.3.3 Dispersie

Onder dispersie wordt verstaan het proces waardoor (sediment)deeltjes door snelheids- en concentratieverschillen over een gebied verspreid worden. Wanneer in een bepaald segment bijvoorbeeld een grotere concentratie gesuspendeerd materiaal aanwezig is dan in de omliggende segmenten dan zal als gevolg van verschillen in de stroomsnelheden tussen de segmenten en het concentratieverschil, het gesuspendeerd materiaal herverdeeld worden onder de segmenten.

In werkelijkheid is de dispersie afhankelijk van de ruwheid, diepte en stroomsnelheid. Bovendien is er een verschil tussen de dispersie in longitudinale richting (in stroomrichting) en in transversale richting (loodrecht op stroomrichting).

De formules voor longitudinale en transversale dispersiecoëfficiënt zijn:

$$\text{Longitudinale Dispersie} \quad D = 6 * \frac{U}{C} * d * \sqrt{g}$$

$$\text{Transversale Dispersie} \quad D = 0,6 * \frac{U}{C} * d * \sqrt{g} \quad \pm 50 \%$$

waarin:

D : dispersiecoëfficiënt	(m ² /s)
U : watersnelheid	(m/s)
C : Chézy-coëfficiënt	(m ^{1/2} /s)
g : valsnelheid	(9,81 m/s ²)
d : waterdiepte	(m)

Met de gebruikte modellering van het gebied is het niet mogelijk om met twee verschillende dispersiecoëfficiënten te rekenen. Dit komt doordat de dispersiecoëfficiënt voor x- en y-richting bepaald moeten worden en deze richtingen meestal niet samenvallen met de stroomrichting. Er is voor gekozen om de grootste dispersiecoëfficiënt, de dispersiecoëfficiënt in longitudinale richting, voor zowel x- als voor y-richting te gebruiken.

In de eerste modellering die tot mijn beschikking was, was voor de dispersiecoëfficiënt één constante waarde voor het hele gebied aangenomen. Bij de eerste berekeningen die uitgevoerd zijn, is de dispersiecoëfficiënt op resp. 0.5 m²/s, 1.0 m²/s, 2.0 m²/s en 5.0 m²/s gesteld. Wanneer in een bepaalde berekening de waarden van de dispersiecoëfficiënt in het hele gebied niet veel variëren, kan met één constante waarde gerekend worden.

In de berekeningen die voor dit onderzoek gedaan zijn, is dit niet het geval. Dit leidde tot instabiliteiten. In de Dordtsche Kil bijvoorbeeld is de dispersiecoëfficiënt gemiddeld 2,0 m²/s, terwijl in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep de dispersiecoëfficiënt ongeveer 0,5 m²/s is. (Dordtsche Kil: $C=60 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $u=0,6 \text{ m/s}$, $d=10 \text{ m}$, Hol. Diep oost: $C=80 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, $u=0,35 \text{ m/s}$, $d=6 \text{ m}$).

Het is daarom beter om de dispersiecoëfficiënt afhankelijk van de waterdiepte en stroomsnelheid te laten zijn. De verschillen in ruwheid zijn verwaarloosd.

In de berekeningen is daarom gebruik gemaakt van de volgende formule om de dispersiecoëfficiënt te berekenen:

$$D = \alpha * U * d$$

formule voor de dispersiecoëfficiënt in de modellering

waarin:

D : dispersiecoëfficiënt (m²/s)

α : factor

U : watersnelheid (m/s)

d : waterdiepte (m)

Gekozen is om voor de factor α één waarde, namelijk 0,3, te nemen die gebaseerd is op de longitudinale dispersie. De dispersiecoëfficiënt wordt per tijdstap voor elk segment voor twee richtingen (x en y) uitgerekend.

Na de dispersiecoëfficiënt niet als constante maar afhankelijk van de stroomsnelheid en de waterdiepte aan te nemen, ontstonden er geen instabiliteiten meer.

7.4 Fysische formulering van het gedrag van sediment

In deze paragraaf zal de fysische achtergrond van het programma DELWAQ behandeld worden en zal uitgelegd worden met welke parameters het model geoptimaliseerd kan worden.

Het programmapakket DELWAQ is gebaseerd op de advection-diffusie vergelijking voor 2-dimensionaal horizontaal slibtransport.

Deze advection-diffusie vergelijking luidt:

$$\frac{\delta(hc_s)}{\delta t} + \frac{\delta(hu_x c_s)}{\delta x} + \frac{\delta(hu_y c_s)}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta x}(hD_x \frac{\delta c}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y}(hD_y \frac{\delta c}{\delta y}) - E + S = 0$$

waarin:

h	= waterdiepte	(m)
c_s	= concentratie	(kg/m ³)
u_x, u_y	= horizontale stroomsnelheid in x, y-richting	(m/s)
D_x, D_y	= horizontale dispersiecoëfficiënt in x, y-richting	(m ² /s)
E	= erosieflux	(kg/m ² s)
S	= sedimentatieflux	(kg/m ² s)

De advection-diffusie vergelijking is gebaseerd op het feit dat er behoud van massa moet zijn. Het programma DELWAQ krijgt de parameters h , u_x en u_y aangeleverd uit de rekenresultaten van de berekening van de waterbeweging met WAQUA. De parameters D_x , D_y , E en S zullen door DELWAQ zelf berekend moeten worden. De concentratie is de gezochte parameter.

De advection-diffusie vergelijking wordt opgelost door gebruik te maken van de Lax-Wendroff methode. Dit komt omdat de ADI-methode niet goed werkte (Collard, 1992). De noodgedwongen keuze van het expliciete schema Lax-Wendroff heeft gevolgen voor de keuze van de dispersie. Om oscillaties tegen te gaan moet voldaan zijn aan de regel dat de som van uitstromende debieten niet groter mag zijn dan de helft van het aanwezige volume (zie paragraaf 7.3.1).

In paragraaf 7.3.3 werd al aangegeven hoe de dispersiecoëfficiënten (D_x , D_y) berekend kunnen worden. De parameters E en S geven de flux van erosie en sedimentatie per bodemoppervlak in de tijd weer en zullen hierna verder toegelicht worden.

Of er sedimentatie van een sedimentfractie optreedt en in welke mate wordt bepaald door de formule van Krone (1962) die als volgt luidt:

$$S = w_s c_s \left(\frac{\tau_{cr,s} - \tau_b}{\tau_{cr,s}} \right) \quad \text{als } \tau_b < \tau_{cr,s}$$

S	= sedimentatieflux	(kg/m ² s)
τ_b	= optredende bodemschuifspanning	(N/m ²)
$\tau_{cr,s}$	= bodemschuifspanning bij begin sedimentatie per fractie	(N/m ²)
w_s	= valsnelheid deeltjes fractie	(m/s)
c_s	= concentratie zwevende deeltjes	(kg/m ³)

Of er erosie optreedt van een bepaalde sedimentfractie wordt bepaald door de formule van Partheniades (1962), die luidt:

$$E = M \left(\frac{\tau_b - \tau_{cr,e}}{\tau_{cr,e}} \right) \quad \text{als } \tau_b > \tau_{cr,e}$$

E	= erosieflux	(kg/m ² s)
τ_b	= optredende bodemschuifspanning	(N/m ²)
$\tau_{cr,e}$	= bodemschuifspanning bij begin erosie	(N/m ²)
M	= erosieconstante	(kg/m ² s)

Het feit of er erosie of sedimentatie plaatsvindt is afhankelijk van de bodemschuifspanning (τ_b). Het programma DELWAQ rekent echter met de gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$). De relatie tussen de gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$) en de bodemschuifspanning (τ) is als volgt:

$$\tau = \frac{\rho g \bar{u}^2}{C^2}$$

τ	= bodemschuifspanning	(N/m ²)
ρ	= dichtheid water	(kg/m ³)
g	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
C	= Chézy coëfficiënt	(m ^{1/2} /s)

De formule van Krone [1962] die bepaalt of er sedimentatie optreedt en in welke mate luidt dan, na invulling van de voorgaande formule, als volgt:

$$S = w_s c_s \left(\frac{u_{cr,s}^2 - \bar{u}^2}{u_{cr,s}^2} \right) \quad \text{als } \bar{u} < u_{cr,s}$$

S	= sedimentatieflux	(kg/m ² s)
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
$u_{cr,s}$	= kritische stroomsnelheid bij begin sedimentatie per fractie	(m/s)
w_s	= valsnelheid deeltjes fractie	(m/s)
c_s	= concentratie zwevende deeltjes	(kg/m ³)

In bovenstaande formule zijn dus de optredende bodemschuifspanning (τ_b) vervangen door een gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$) en de kritische bodemschuifspanning ($\tau_{cr,s}$) door een kritische stroomsnelheid ($u_{cr,s}$).

De formule van Partheniades luidt na invulling van de stroomsnelheid:

$$E = M \left(\frac{\bar{u}^2 - u_{cr,e}^2}{u_{cr,e}^2} \right) \quad \text{als } \bar{u} > u_{cr,e}$$

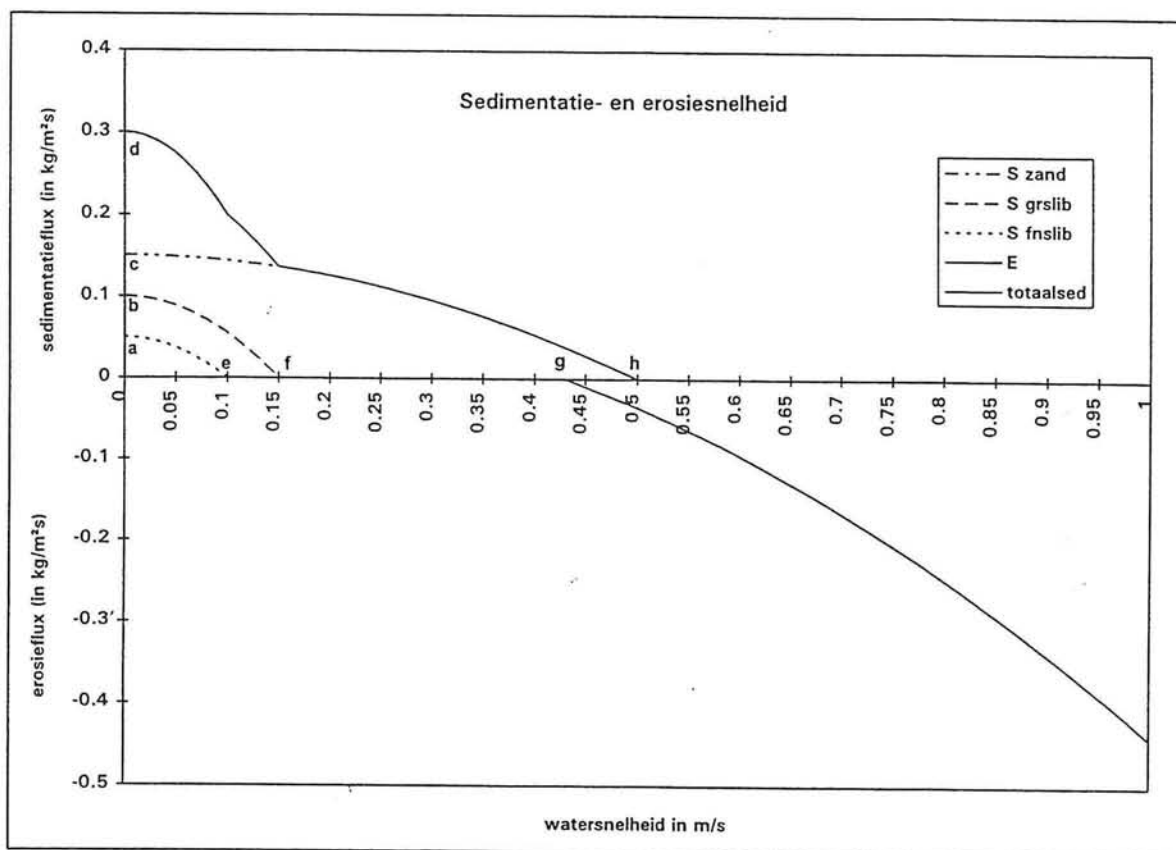
E	= erosieflux	(kg/m ² s)
$\bar{u}$	= gemiddelde stroomsnelheid	(m/s)
$u_{cr,e}$	= bodemschuifspanning bij begin erosie	(m/s)
M	= erosieconstante	(kg/m ² s)

In bovenstaande formule zijn dus de optredende bodemschuifspanning (τ_b) vervangen door een gemiddelde stroomsnelheid ($\bar{u}$) en de kritische bodemschuifspanning ($\tau_{cr,e}$) door een kritische stroomsnelheid ($u_{cr,e}$).

Zoals in paragraaf 7.1 al is aangegeven, is in het onderzoek met drie fracties gerekend. Het rekenen met drie fracties komt beter met de werkelijkheid overeen dan een berekening met één fractie zoals in het verleden veel gebeurd is. Daarom is tijdens het onderzoek gerekend met een zandfractie, een grof slibfractie en een fijn slibfractie. Voor elke fractie kunnen apart de parameters die gebruikt worden in de modellering van sedimentatie ingevoerd

worden. In de modellering van erosie is de uitsplitsing in drie fracties niet gemaakt (zie paragraaf 7.1).

De schematisatie van het gedrag van de drie bovengenoemde fracties is weergegeven in figuur 7.1. In deze figuur is de mate van sedimentatie en erosie (zoals beschreven door Krone en Partheniades) uitgezet tegen de gemiddelde stroomsnelheid. In de figuur zijn de fracties apart en cumulatief weergegeven.



Figuur 7.1 Schematisatie gedrag fracties

Aan de hand van de in de figuur 7.1 geplaatste letters zal hieronder een beschrijving volgen van de verschillende situaties die zich kunnen voordoen.

a, b en c : Wanneer de stroomsnelheid gelijk is aan nul (b.v. tijdens stroomkentering) dan is de sedimentatieflux en dus de mate van sedimentatie, het grootst. Dit is voor elke fractie gelijk aan:

$$w_s * c_s$$

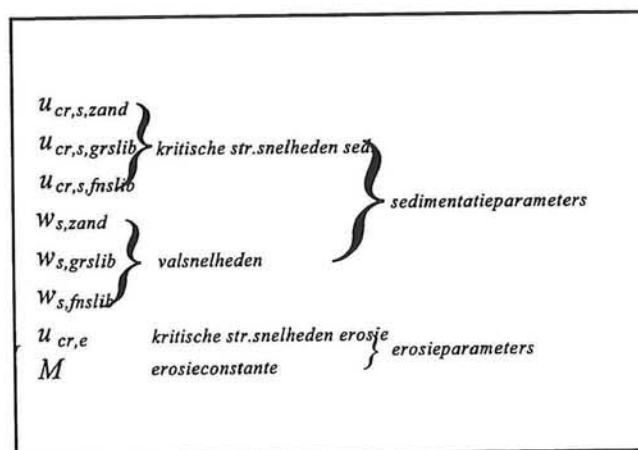
d :dit is de totale sedimentatieflux (dus van alle fracties samen) bij een stroomsnelheid van nul.

Als de stroomsnelheid groter dan nul wordt, dan loopt de sedimentatieflux terug. De snelheid van sedimentatie vermindert dan. Zoals ook in op pagina 62 te zien is, is de verhouding tussen de stroomsnelheid en de sedimentatie en erosieflux kwadratisch.

- e :Dit is het punt waarbij de kleinste fractie niet meer sedimenteert. Bij een grotere stroomsnelheid blijven alle deeltjes van de kleinste fractie in suspensie (of eroderen).
- f :Dit is het punt waarbij ook de middelste fractie niet meer sedimenteert. Alleen de grootste fractie sedimenteert nog bij grotere stroomsnelheden.
- g :Vanaf dit punt vindt er erosie van alle fracties plaats. Bij deze stroomsnelheid vindt er ook nog sedimentatie plaats van de grootste fractie. De overlap tussen de punten g en h wordt gebruikt om het bodemtransport te simuleren.
- h :Op dit punt is ook de sedimentatie van de grootste fracties opgehouden. Bij grotere watersnelheden vindt alleen nog erosie plaats.

Bij de figuur moet wel opgemerkt worden dat de mate van sedimentatie of erosie afhankelijk is van de hoeveelheid beschikbaar materiaal. Daardoor kan het gebeuren dat bij een hoge stroomsnelheid meer sedimentatie optreedt dan bij een lagere stroomsnelheid. Dit is het geval als de concentratie bij de hogere stroomsnelheid veel groter is dan de concentratie bij de lagere stroomsnelheid.

Voor de modellering van het gedrag van sediment zijn dus de volgende parameters nodig:



Deze parameters zijn door middel van calibratie bepaald. In paragraaf 7.5 zal uitgelegd worden op welke manier dit is gebeurd en welke waarden deze parameters in het verdere onderzoek hebben gekregen.

7.5 Parameters in modellering gedrag sediment

7.5.1 Inleiding

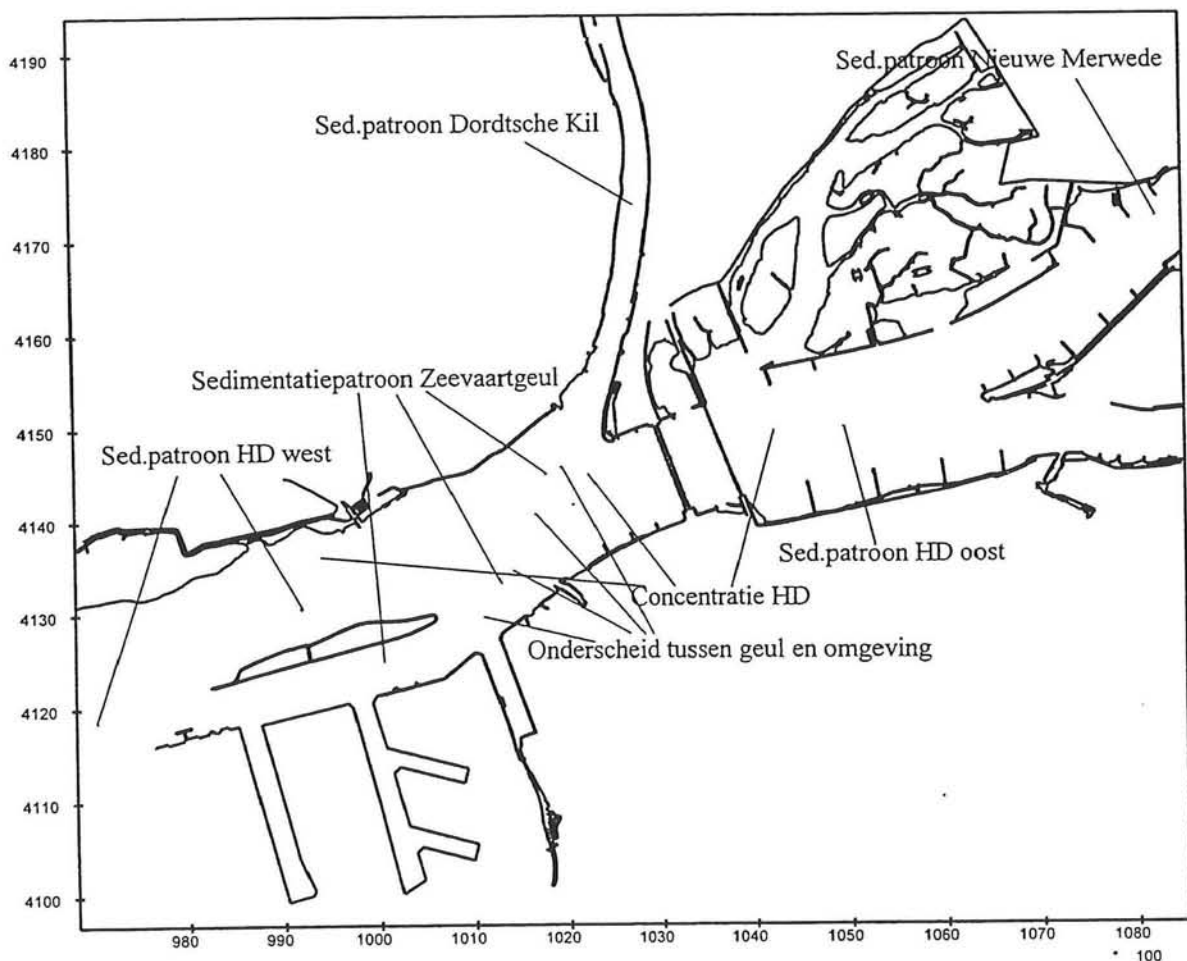
Zoals in paragraaf 7.4 al is genoemd zijn een aantal parameters beschikbaar om het gedrag van sediment te calibreren. Deze parameters hebben te maken met het moment en de mate van sedimentatie en erosie. Alvorens tot de methode van vaststelling van deze parameters over te gaan zullen eerst de gebruikte criteria die gebruikt zijn om de resultaten te beoordelen beschreven worden in paragraaf 7.5.2. Hierna volgen in paragraaf 7.5.3 de sedimentatieparameters en in paragraaf 7.5.3 de erosieparameters. In paragraaf 7.5.4 volgen dan de uiteindelijk gebruikte waarden voor de verschillende parameters en de conclusies.

7.5.2 Criteria voor het bepalen van de parameters

Het belangrijkste criterium voor het vinden van de juiste parameters is dat het eindresultaat van de berekening met deze parameters zo veel mogelijk de werkelijkheid moet benaderen. Om tot een zo goed mogelijk resultaat te komen zijn een aantal criteria nodig waaraan de resultaten van de berekeningen getoetst kunnen worden. Tijdens het onderzoek zijn de volgende criteria gebruikt (zie ook figuur 7.2):

- Sedimentatiepatroon geul: De sedimentatie in de zeevaartgeul heeft een duidelijk verloop in lengterichting van de geul. Het zwaartepunt van de sedimentatie ligt bij de monding van het Zuid-Hollandsch Diep. In het noordelijk deel van de oversteek bij de monding van de Dordtsche Kil sedimenteert voornamelijk zand en in het zuidelijk deel van de oversteek en in de monding van het Zuid-Hollandsch Diep sedimenteert voornamelijk grof slib. Verder in het Zuid-Hollandsch Diep sedimenteert voornamelijk fijn slib (uit RWS, 1989).
- Onderscheid geul t.o.v. de omgeving: in de geul komt in werkelijkheid twee tot drie keer zoveel sediment neer als in de omgeving. Als toetsmiddel is daarom over 4 dwarsprofielen het verschil tussen de geul en de omgeving berekend.
- Bodemontwikkeling Nieuwe Merwede: Bij hoge afvoeren bleek in bijna alle gevallen erosie op te treden op de Nieuwe Merwede. In werkelijkheid is de bodemligging van de Nieuwe Merwede stabiel. Getracht moet dus worden om de erosie bij hoge afvoeren met sedimentatie bij een gemiddelde afvoer te compenseren.
- Bodemontwikkeling Dordtsche Kil: Op de Dordtsche Kil treedt in werkelijkheid erosie op ($\pm 0,15$ m/jaar). In alle berekeningen kwam erosie op de Dordtsche Kil voor. Deze was bij sommige berekeningen te hoog.

- Bodemontwikkeling Hollandsch Diep oost: In het gedeelte van het Hollandsch Diep tussen de monding van de Nieuwe Merwede en de Moerdijkbruggen treedt een gemiddelde sedimentatie op. Deze werd bij sommige berekeningen wel gevonden, bij andere berekeningen was deze juist te hoog of te laag.
- Bodemontwikkeling Hollandsch Diep west: De grootste sedimentatie in het Hollandsch Diep vindt plaats in de zeevaartgeul en ten noorden van de Sassenplaat. Bij sommige berekeningen liep deze sedimentatie te ver in westelijke richting door. In het deel ten westen van Klundert sedimenteert alleen materiaal in de diepe geulen. Het zwaardere materiaal (zand en grote slibdeeltjes) zit dan niet meer in de suspensie.
- Concentratieverloop Hollandsch Diep: Uit de meetcampagne 73-78 zijn de randvoorwaarden gehaald voor de berekening. De concentraties zoals gemeten in het gebied tijdens deze meetcampagne moeten overeenstemmen met de berekende concentraties op die plaatsen.



Figuur 7.2 Toetsingscriteria parameters

Bij de ijking zijn voor elk criterium de verschillende berekeningen in drie groepen ingedeeld: een slechte groep (waarde 0), een gemiddelde groep (waarde 1) en een goede groep (waarde 2). Door aan elk criterium een gewicht toe te kennen, kwam de berekening met de beste resultaten naar voren. Dit is in totaal drie keer gedaan en met de beste waarden is na elke evaluatie verder gemodelleerd. Deze werkwijze leverde uiteindelijk één optimale berekening op. De parameters die in deze berekening gebruikt zijn, werden de optimale parameters. In de volgende paragrafen worden deze parameters verder beschreven.

7.5.3 Sedimentatieparameters

De volgende parameters zijn van invloed op de sedimentatie van materiaal in het gebied:

- kritische stroomsnelheid voor sedimentatie ($u_{cr,s}$) van elke fractie
- valsnelheden (w_s) van elke fractie

Hieronder worden deze parameters verder behandeld.

7.5.3.1 Kritische stroomsnelheden voor sedimentatie

Elke fractie heeft een kritische stroomsnelheid voor sedimentatie. Als de optredende stroomsnelheid onder deze kritische stroomsnelheid komt dan vindt er sedimentatie van de fractie plaats. In figuur 7.1 zijn dit de watersnelheden die behoren bij de punten e, f en h.

De waarde van deze kritische stroomsnelheid voor sedimentatie bepaalt op welke plaats of wanneer gedurende het getijde in het gebied sedimentatie optreedt. Hierdoor kan het sedimentatiepatroon en de sedimentbeweging geoptimaliseerd worden.

De kritische stroomsnelheid voor sedimentatie is afhankelijk van de grootte van de sedimentdeeltjes. De grootste fractie heeft de hoogste kritische stroomsnelheid voor sedimentatie en zal dus bij een afnemende stroomsnelheid als eerste fractie gaan sedimenteren (zie figuur 7.1).

In tabel 7.2 zijn de verschillende waarden voor de kritische stroomsnelheden voor sedimentatie vermeld.

	kritische stroomsnelheden voor sedimentatie $u_{cr,s}$ (in m/s)		
fractie	minimale waarde	optimale waarde	maximale waarde
zand	0,35	0,50	0,75
grof slib	0,10	0,15	0,43
fijn slib	0,05	0,10	0,33

Tabel 7.2 Kritische stroomsnelheden voor sedimentatie

In onderstaande tabel 7.3 staan de resultaten van de sedimentatie voor de minimale, optimale en maximale waarden voor stroomsnelheden.

Rijnaafvoer	waarden tabel 7.2	Sedimentatie in mm per getij		
		Dordtsche Kil	N.Merwede	Geul bij Moerdijk
2200 m ³ /s	minimale waarden	-0,43	0,00	0,27
	optimale waarden	-0,43	0,26	0,27
	maximale waarden	-0,39	0,59	0,17
3500 m ³ /s	minimale waarden	-0,30	-0,14	0,28
	optimale waarden	-0,28	-0,14	0,28
	maximale waarden	-0,22	-0,13	0,59
5000 m ³ /s	minimale waarden	-0,24	-0,39	0,12
	optimale waarden	-0,18	-0,39	0,26
	maximale waarden	0,04	-0,39	0,79

Tabel 7.3 Sedimentatie in mm per getij in de Dordtsche Kil, Nieuwe Merwede en de Zeevaartgeul voor verschillende waarden van kritische stroomsnelheden voor sedimentatie

Overige parameters: $w_{s,zand}$: 0,25 mm/s, $w_{s,grslib}$: 0,10 mm/s, $w_{s,fnslib}$: 0,05 mm/s
 $u_{cr,e}$: 0,43 m/s M : $5 \cdot 10^{-6}$ kg/m²s

In Kuijper et al. (1993) en in Collard (1992) werd voor de kritische stroomsnelheid voor sedimentatie 0,23 m/s aangenomen. Gedurende het onderzoek werd duidelijk dat deze waarde voor de beide slibfracties te hoog ligt.

Bij de bepaling van de juiste waarden voor de kritische stroomsnelheid voor sedimentatie is vooral gelet op het sedimentatie-patroon in de zeevaartgeul en op de Nieuwe Merwede. Op de Nieuwe Merwede bleek namelijk bij hoge Rijnaafvoeren de mate van erosie nauwelijks af te hangen van de grootte van de kritische stroomsnelheden voor sedimentatie (zie tabel 7.3). Getracht is om met de kritische stroomsnelheid de grootte van erosie op de Nieuwe Merwede te bepalen.

Bij een Rijnaafvoer van 2200 m³/s hadden hoge waarden voor de kritische stroomsnelheden voor sedimentatie tot gevolg dat op de Nieuwe Merwede en bij de monding van de Dordtsche Kil in het Hollandsch Diep een te grote sedimentatie plaatsvond, waardoor er in de overige delen van het gebied te weinig sedimenteerde.

Het sedimentatiepatroon is op twee manieren beïnvloed. Allereerst moest het zwaartepunt van de sedimentatie in de geul bij de monding van het Zuid-Hollandsch Diep liggen. De verdeling tussen de twee gedeeltes van de zeevaartgeul met de oude scheidslijn moest ongeveer 2/3 en 1/3 zijn. Dit criterium bleek al snel zinvol voor de kritische stroomsnelheden voor de beide slibfracties.

Het tweede criterium was dat de zandfractie met name in het bovenste deel van de oversteek moest sedimenteren. Verder moest de grof slibfractie in het zuidelijk deel van de oversteek en de fijn slibfractie in het Zuid-Hollandsch Diep sedimenteren. Dit criterium was vooral bruikbaar om de grootte van de kritische stroomsnelheden voor de slibfracties te bepalen.

De kritische stroomsnelheid voor sedimentatie van de zandfractie is dusdanig gekozen dat deze groter is dan de kritische stroomsnelheid voor erosie. Op die manier kan bodemtransport gesimuleerd worden.

7.5.2.2 Valsnelheden van de fracties

Per fractie is ook de valsnelheid in te stellen. Met deze valsnelheid is de snelheid van sedimentatie te bepalen. In figuur 7.1 de hoogte van de ligging van de punten a,b,c en d hiervan afhankelijk. Bij een hoge valsnelheid zal de fractie bij het bereiken van de kritische stroomsnelheid snel gaan sedimenteren. Bij een te hoge valsnelheid is de sedimentatie te veel aan enkele plaatsen gebonden. Bij een lage valsnelheid spreidt de sedimentatie zich te veel of sedimenteert er te weinig materiaal.

Hieronder volgt een overzicht van de gebruikte valsnelheden:

	Valsnelheden w_s (in mm/s)		
fractie	minimale waarden	optimale waarden	maximale waarden
zand	0,15	0,25	0,50
grof slib	0,05	0,10	0,25
fijn slib	0,005	0,05	0,10

Tabel 7.4 Minimale, optimale en maximale waarden voor de valsnelheid w_s die in het onderzoek gebruikt zijn

In tabel 7.5 staan de resultaten van de sedimentatie voor de minimale, optimale en maximale waarden voor valsnelheden.

Rijnaafvoer	waarden uit tabel 7.4	Sedimentatie in mm per getij		
		Dordtsche Kil	N.Merwede	Geul bij Moerdijk
2200 m ³ /s	minimale waarden	-0,44	0,16	0,19
	optimale waarden	-0,43	0,26	0,27
	maximale waarden	-0,39	0,48	0,34
3500 m ³ /s	minimale waarden	-0,31	-0,14	0,22
	optimale waarden	-0,28	-0,14	0,28
	maximale waarden	-0,23	-0,14	0,30
5000 m ³ /s	minimale waarden	-0,23	-0,39	0,20
	optimale waarden	-0,18	-0,39	0,26
	maximale waarden	-0,08	-0,39	0,34

Tabel 7.5 Sedimentatie in mm per getij in de Dordtsche Kil, Nieuwe Merwede en de Zeevaartgeul voor verschillende waarden van valsnelheden

Overige parameters: $u_{cr,s,zand}$: 0,50 m/s, $u_{cr,s,grslib}$: 0,15 m/s, $u_{cr,s,fnslib}$: 0,10 m/s
 $u_{cr,e}$: 0,43 m/s M : $5 \cdot 10^{-6}$ kg/m²s

In Kuijper et al.(1990) is voor de gemiddelde valsnelheid 0,20 à 0,30 mm/s genomen, in Verbeek (1991) en Collard (1992) werd hiervoor 0,20 mm/s genomen.

De valsnelheden bleken achteraf de moeilijkste grootheid om goed te modelleren. Dit komt omdat niet direct in een resultaat het verschil te zien is. Gedurende het onderzoek zijn lange tijd de maximale waarden gebruikt. Deze zijn afkomstig uit de resultaten van het onderzoek met het "VIS"-meetsysteem (Verbeek, 1991) dat op verschillende plekken in het Hollandsch Diep is gedaan. Voor het onderzoek zijn de resultaten van de metingen van valsnelheden bij Willemstad en bij de Sassenplaat gebruikt. De valsnelheden zijn in drie groepen verdeeld waarna van elke groep het gemiddelde is bepaald. Deze gemiddelden zijn vervolgens gebruikt.

De valsnelheid voor zand is erg laag. Uitgaande van Stokes moet de waarde voor zand minstens op 3 mm/s liggen ($d = 60 \mu m$). Bij een $u_{cr,s}$ van 0,50 m/s horen juist korrels met een diameter van enkele millimeters.

Bij een vergelijking van de verschillende sommen bleek dat de combinatie van valsnelheden toch te hoog gekozen was en dat de halve waarden een beter resultaat gaven.

De mate van sedimentatie is behalve van de parameters die in paragraaf 7.5.2 besproken zijn ook nog afhankelijk van de concentratie in de suspensie. Bij een hogere concentratie zal meer sediment bezinken (zie paragraaf 7.4).

7.5.3 Erosieparameters

In de modellering van erosie is uitgegaan van een modellering waarbij alle fracties dezelfde parameters hebben. De parameters die bij erosie een rol spelen zijn:

- kritische stroomsnelheid voor erosie
- erosieconstante M

Hieronder volgt een beschrijving van deze twee parameters.

7.5.3.1 Kritische stroomsnelheid voor erosie

Bij lage stroomsnelheden vindt geen erosie plaats. Pas wanneer de stroomsnelheden boven een bepaalde kritische stroomsnelheid komen is er sprake van erosie van het bodemmateriaal. Net als bij sedimentatie bepaalt de grootte van deze kritische stroomsnelheid voor erosie op welke plaatsen in het gebied en in welk gedeelte van het getijde erosie optreedt.

De resultaten bleken erg gevoelig voor de erosieparameters te zijn. Dit komt omdat op sommige plaatsen bij sommige berekeningen voortdurend erosie plaatsvindt. Dit is het geval op de Dordtsche Kil bij een Rijnaafvoer van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ en op de Nieuwe Merwede bij een Rijnaafvoer van $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ en $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze voortdurende erosie zorgde ervoor dat bij een kleine verlaging van de kritische stroomsnelheid voor erosie, de mate van ontgroning fors omhoog ging.

In tabel 7.6 staan de gebruikte waarden voor kritische stroomsnelheid voor erosie en de daarbij optredende sedimentatie (+) of erosie (-) op enkele plaatsen in het gebied:

situatie	$u_{cr,e}$ (in m/s)	Sedimentatie in mm per getij		
		Dordtsche Kil rand	Nieuwe Merwede rand	Moerdijk geul
2200/min	0,30	-0,98	0,40	0,35
2200/opt	0,43	-0,39	0,48	0,33
2200/max	0,55	-0,17	0,48	0,33
3500/min	0,30	-0,70	-0,40	0,32
3500/opt	0,43	-0,23	-0,14	0,30
3500/max	0,55	-0,06	-0,04	0,30
5000/min	0,30	-0,49	-0,92	0,34
5000/opt	0,43	-0,08	-0,39	0,34
5000/max	0,55	0,05	-0,20	0,33

Tabel 7.6 Sedimentatie in mm per getijde bij verschillende kritische stroomsnelheden voor erosie

Overige parameters: $u_{cr,s,zand}$: 0,50 m/s, $u_{cr,s,grslib}$: 0,15 m/s, $u_{cr,s,fnslib}$: 0,10 m/s
 $w_{s,zand}$: 0,50 mm/s, $w_{s,grslib}$: 0,25 mm/s, $w_{s,fnslib}$: 0,10 mm/s
 M : $5 \cdot 10^{-6}$ kg/m²s

In tabel 7.6 zijn de waarden voor de sedimentatie afhankelijk van de kritische stroomsnelheid voor erosie gepresenteerd. De overige instellingen zijn constant gehouden. In tabel 7.7 is de relatie weergegeven tussen de kritische stroomsnelheid voor erosie $u_{cr,e}$ en de bodemschuifspanning $\tau_{cr,e}$ (voor formule: zie paragraaf 7.4).

kritische stroomsnelheid $u_{cr,e}$ (m/s)	$\tau_{cr,e}$ (N/m ²)
0,30	0,25
0,43	0,50
0,55	0,82

Tabel 7.7 Kritische stroomsnelheden omgerekend naar bodemschuifspanningen met $\rho=1000$ kg/m³, $g=9,81$ m/s², $C=60$ m^{1/2}/s

In Kuijper et al. (1990) kwam naar voren dat de $\tau_{cr,e} = 0,50$ N/m² een acceptabele waarde voor het gebied is. Bij een lagere waarde is het verschil op de Dordtsche Kil te groot. Bij een hoge waarde moet ook de grootte van de kritische stroomsnelheid voor sedimentatie van zand omhoog om bodemtransport te modelleren.

7.5.3.2 Erosieconstante M

De erosieconstante M wordt gebruikt om allerlei secundaire invloeden op de erosie mee te nemen. De coëfficiënt M is afhankelijk van τ_e en tevens afhankelijk van de plaats in het gebied. Deze constante heeft dan ook in de literatuur veel verschillende waarden. Soms zit in deze constante bijvoorbeeld de invloed van turbulentie, windgolven e.d. In tabel 7.8 volgt een overzicht van de waarden uit de literatuur.

	erosieconstante M (kg/m ² s)
Partheniades	$4,9 * 10^{-8}$
Velzen, 1988	$5 \text{ à } 10 * 10^{-6}$
Kuijper et al., 1990	$0,1 \text{ à } 1,0 * 10^{-3}$
Collard, 1992	$2 * 10^{-4}$
Verbeek, 1994	$2 * 10^{-5}$

Tabel 7.8 Waarden voor Erosieconstante M in literatuur

Voor het onderzoek leverde de waarden van Collard en Velzen de volgende resultaten op:

	Sedimentatie in mm per getij		
waarde M (in kg/m ² s)	D.Kil rand	N.Merwede rand	Moerdijk geul
$2. 10^{-4}$	ca. + 10,0	-0,68	0,70
$5. 10^{-6}$	-0,43	0,26	0,27

Tabel 7.9 Sedimentatie in mm per getijde met verschillende waarde van de erosieconstante
Met: Rijnaflow van 2200 m³/s

Overige parameters: $u_{cr,s,zand}$: 0,50 m/s, $u_{cr,s,grslib}$: 0,15 m/s, $u_{cr,s,fnslib}$: 0,10 m/s
 $w_{s,zand}$: 0,25 mm/s, $w_{s,grslib}$: 0,10 mm/s, $w_{s,fnslib}$: 0,05 mm/s
 $u_{cr,e}$: 0,43 m/s

De invloed van de erosieconstante M is alleen onderzocht voor een Rijnaflow van 2200 m³/s. De waarde voor erosie bij de rand van de Dordtsche Kil is achteraf bepaald, omdat na 5 dagen inspeeltijd de hele bodemlaag van 0,1 meter praktisch verdwenen was. In 10 getijden is er dus 10 mm per getijde verdwenen.

De uitkomsten van de berekening met de waarde van Partheniades zijn helaas verloren gegaan. Er restte geen tijd meer om deze berekening nog te herhalen. Destijds is deze waarde afgefallen omdat bij een Rijnaflow van 2200 m³/s op de Dordtsche Kil geen erosie maar sedimentatie plaatsvond en bij hogere Rijnaflowen de mate van erosie op de Nieuwe Merwede afnam. De waarden van Verbeek zijn niet meer in de berekeningen meegenomen.

In het verdere onderzoek is voor de erosieconstante M de waarde $5 * 10^{-6}$ kg/m²s genomen.

7.5.4 Samenvatting en commentaar

In tabel 7.10 staan de optimale waarden voor de kritische stroomsnelheden en de andere parameters weergegeven.

sedimentatieparameters	notatie	waarde
kritische stroomsnelheid voor zand	$u_{cr,s,zand}$	0,50 m/s
kritische stroomsnelheid voor grof slib	$u_{cr,s,grslib}$	0,15 m/s
kritische stroomsnelheid voor fijn slib	$u_{cr,s,fnslib}$	0,10 m/s
valsnelheid van zand	$w_{s,zand}$	0,25 mm/s
valsnelheid van grof slib	$w_{s,grslib}$	0,10 mm/s
valsnelheid van fijn slib	$w_{s,fnslib}$	0,05 mm/s
erosieparameters	notatie	waarde
kritische stroomsnelheid voor erosie	$u_{cr,e}$	0,43 m/s
erosieconstante	M	$5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$

Tabel 7.10 Waarden van sedimentparameters zoals gebruikt in de modellering

Het bleek in een laat stadium niet mogelijk de berekende sedimentatie kloppend te krijgen met de werkelijke sedimentatie. Dit onder andere omdat de gridgrootte te groot is om de geul goed te kunnen modelleren. Ook spelen nog andere factoren zoals de modellering van het zandtransport en het bodemtransport een rol. Ik verwacht dat vooral met deze laatste twee factoren een verbetering bereikt kan worden. Bovendien is ook een aantal processen die in werkelijkheid wel optreden, niet gemodelleerd. Te denken valt aan de invloed van turbulentie, oevererosie en scheepvaartbewegingen.

Overigens is het vrij moeilijk een goed beeld te krijgen van de werkelijk optredende waarden. De bodem van het Hollandsch Diep is voortdurend in beweging en de jaarlijkse baggeractiviteiten zorgen voor een vertroebeling van het beeld in de zeevaartgeul. In het Hollandsch Diep komt de bodem met een snelheid van 0,1 m/jaar omhoog en in de geul is dit ongeveer 0,2 à 0,3 m/jaar.

Het model is ontwikkeld om vooral een beeld te krijgen van de sedimentbeweging in het gebied en in welke gedeelten sedimentatie dan wel erosie optreedt. Dit onderzoek was het eerste waar met het model gedetailleerd is gekeken naar sedimentatie en erosie in enkele punten.

Ik heb daarom in eerste instantie niet gekeken naar de grootte van de sedimentatie in de geul in vergelijking tot de werkelijke sedimentatie, maar naar de sedimentatie in het hele model/gebied.

De kritische stroomsnelheid voor sedimentatie van de zandfractie is dusdanig gekozen dat

deze groter is dan de kritische stroomsnelheid voor erosie. Op die manier kan bodemtransport gesimuleerd worden. In een vak sedimenteert dan een deel van een fractie terwijl een ander deel tegelijkertijd erodeert.

Of deze modellering zinvol is geweest betwijfel ik achteraf. Waarschijnlijk beter is om in de slibmodules met een extra bodemlaag te rekenen die afhankelijk van de stroomsnelheid met een bepaalde snelheid beweegt. In het model wordt dan met twee in plaats van met één laag gerekend (semi-driedimensionale modellering). Met de bovenste laag wordt dan al het suspensie transport gemodelleerd en met de onderste laag wordt dan het bodemtransport gemodelleerd. Dit benadert de werkelijkheid beter. Op deze wijze kunnen alle fracties die in werkelijkheid d.m.v. bodemtransport getransporteerd worden (zie paragraaf 6.3) ook in het model in de extra bodemlaag getransporteerd worden.

Bij een kritische stroomsnelheid voor sedimentatie van zand ($u_{cr,s,zand}$) van 0,50 m/s horen volgens Shields korrels met een diameter van enkele millimeters. De valsnelheid die voor zand gebruikt is (0,25 mm/s) hoort, uitgaande van Stokes, bij veel kleinere korrels (< 60µm). Dit geeft al aan dat de modellering die gebruikt is voor het gedrag van zand niet optimaal is.

In de modellering is de waarde van deze kritische stroomsnelheid voor het hele gebied hetzelfde. Dit zal in werkelijkheid niet het geval zijn. Op plaatsen waar over het getijde heen netto erosie optreedt, zal elk getijde een laag eroderen die daar lange tijd heeft gelegen. Deze laag is veel compacter van samenstelling dan een laag die in een eerder deel van het getijde door sedimentatie is ontstaan. Bij een compactere laag is de kritische stroomsnelheid voor erosie hoger dan bij een laag met een lossere samenstelling.

8 Resultaten van de berekening van het nulalternatief

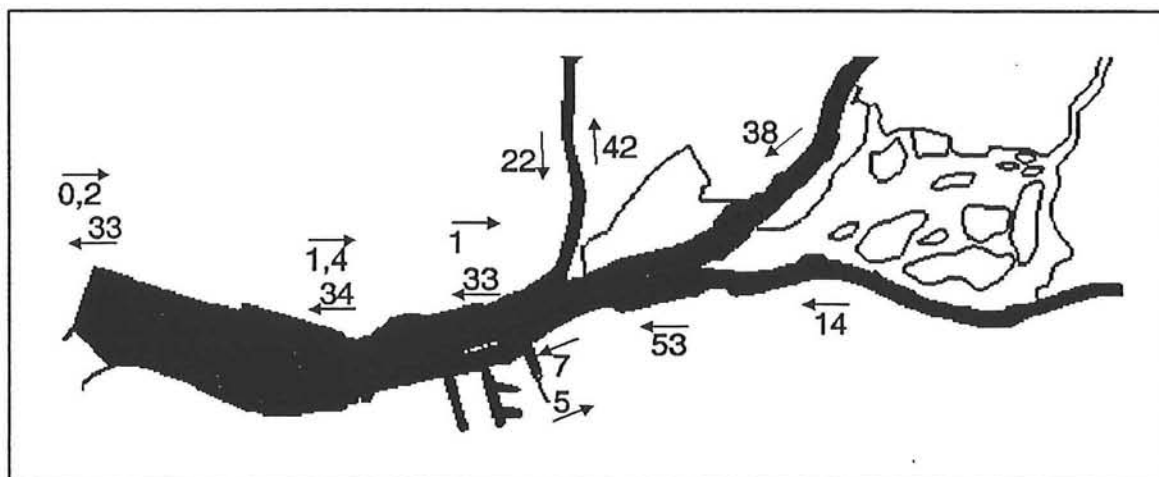
In dit hoofdstuk en in de volgende hoofdstukken worden de resultaten van de uitgevoerde berekeningen bespreken. Dit hoofdstuk bevat de resultaten van de berekening met de modellering van de huidige situatie. Dit is het nulalternatief.

In paragraaf 8.1 zijn de resultaten van de berekeningen met een Rijnafvoer van 2200 m³/s te vinden, in paragraaf 8.2 de resultaten van de berekeningen met een Rijnafvoer van 3500 m³/s en in paragraaf 8.3 de resultaten van de berekeningen met een Rijnafvoer van 5000 m³/s. Bij elke Rijnafvoer hoort een Maasafvoer met een onderschrijdskans van 50% bij die Rijnafvoer (zie paragraaf 5.3). Tenslotte zullen in paragraaf 8.4 de resultaten voor de uiteindelijke sedimentatie gepresenteerd worden.

8.1 Resultaten bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s

8.1.1 Waterbeweging bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s

Bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s is de opening van de Haringvlietsluizen klein (200 m² van de 6000 m²). De afvoer vanuit het Hollandsch Diep naar het Haringvliet is daardoor minder groot dan bij hogere Rijnafvoeren. Dit heeft ook invloed op de getijbeweging die bij een lage Rijnafvoer klein is. De aangevoerde watermassa blijft daardoor langer in het gebied aanwezig. Hieronder is schematisch weergegeven wat de eb- en vloedvolumes per getij zijn (gegevens uit berekening met WAQUA).



Figuur 8.1 Eb- en vloedvolumes bij Rijnafvoer 2200 m³/s en nulalternatief
(volumes in mln m³)

Zoals in figuur 8.1 te zien is, wordt netto per getij het grootste deel via het Haringvliet afgevoerd, namelijk 33 miljoen m³. De grootste getijbeweging vindt echter plaats op de Dordtsche Kil. In bijlage V.1.1 is het stroombeeld gedurende verschillende stadia van het getij te zien.

Er zijn twee verschillende stroombeelden te zien. Tussen vloed en eb (figuur 1), wanneer het waterniveau in het gebied zakt, stroomt water vanuit de Nieuwe Merwede en de Amer via het oostelijk deel van het Hollandsch Diep naar de Dordtsche Kil. In het westelijke deel van het Hollandsch Diep staat nauwelijks stroming. Dit stroombeeld gaat door tot aan eb (figuur 2). Tussen eb en vloed (figuur 3) en tijdens vloed (figuur 4) is de stroomrichting op de Dordtsche Kil omgekeerd en stroomt er water vanuit de Dordtsche Kil het Hollandsch Diep op. Alleen in het westelijk deel van het Hollandsch Diep is er stroming, in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep is daarentegen nauwelijks stroming.

Hieruit blijkt dat de functie van de Dordtsche Kil tweeledig is: van het instromende water wordt de helft (20 miljoen m³) afgevoerd via de Oude Maas naar zee en de andere helft (22 miljoen m³) stroomt voor en tijdens vloed op het Hollandsch Diep weer terug naar het Hollandsch Diep. De Nieuwe Merwede en de Amer zorgen alleen voor aanvoer van water en het Haringvliet voornamelijk voor afvoer.

In onderstaande tabel 8.1 staan de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstand en stroomsnelheid op diverse plaatsen in het gebied.

Waterstanden in m. boven NAP	minimum	gemiddeld	maximum
H-Moerdijk	0.41	0.54	0.67
H-Kop van het Land	0.48	0.63	0.76
H-Keizersveer	0.42	0.57	0.72
H-Dordtsche Kil	0.32	0.50	0.71
Stroomsnelheden in m/s	minimum	gemiddeld	maximum
U-Hollandsch Diep west	0.00	0.08	0.20
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.00	0.06	0.15
U-Oversteek	0.02	0.07	0.19
U-Hollandsch Diep oost	0.02	0.19	0.31
U-Mond Amer	0.00	0.07	0.14
U-Mond Nieuwe Merwede	0.11	0.22	0.27
U-Dordtsche Kil	0.04	0.78	1.02

Tabel 8.1 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstanden en stroomsnelheden bij een Rijnaflow van 2200 m³/s voor de huidige situatie

Bij de waarden in tabel 8.1 moet wel vermeld worden dat de stroomsnelheden alleen de absolute waarden zijn. Op een aantal plaatsen keert de waterbeweging tijdens het getij om, zodat de feitelijke minimale waarde kleiner dan nul is.

8.1.2 Sedimentbeweging en sedimentatie bij een Rijnafoer van 2200 m³/s

De sedimentbeweging is overeenkomstig de waterbeweging. In bijlage V.1.2 is de beweging van de grof slibfractie weergegeven bij een Rijnafoer van 2200 m³/s. In bijlage V.1.3 is de verandering in de bodemdikte gedurende het getij weergegeven.

De beweging van het grof slib komt overeen met de beweging van fijn slib en zand. De fijn slibfractie sedimenteert nog minder en een groot deel van de fractie stroomt in suspensie het gebied uit. Het aangevoerde zand sedimenteert vrijwel geheel in het gebied.

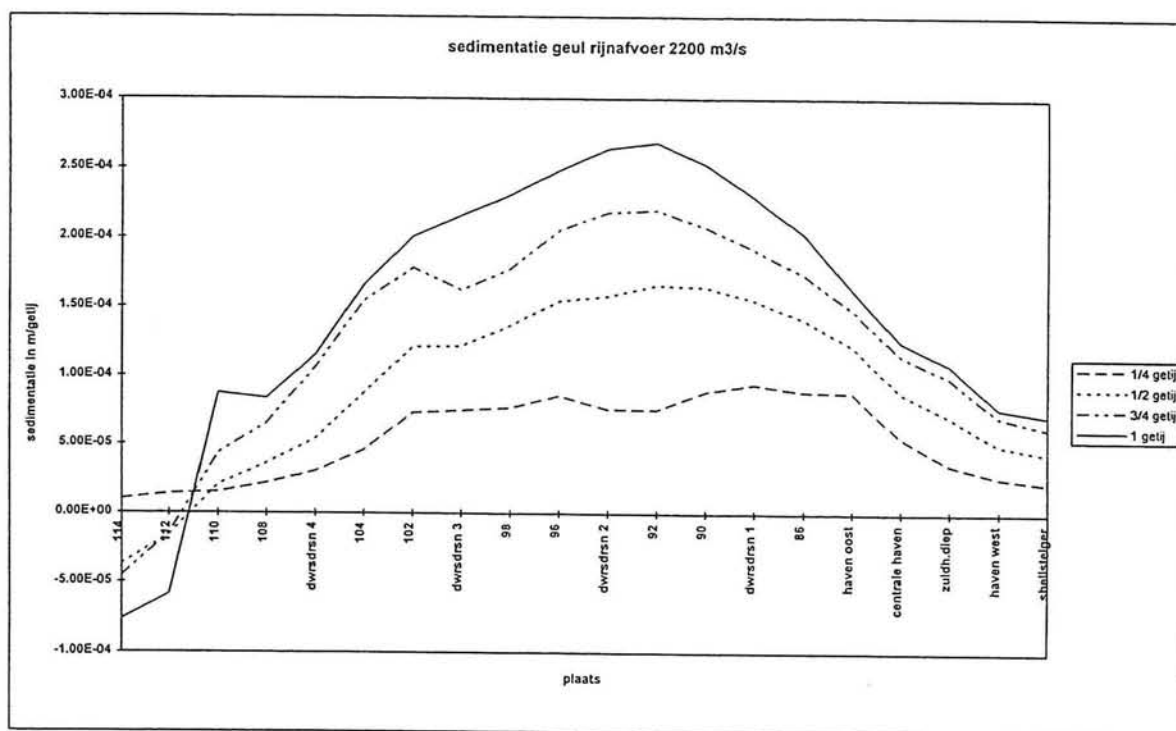
Tussen vloed en eb (figuur 1) stroomt er sediment vanaf het Hollandsch Diep de Dordtsche Kil op. Dit sediment is afkomstig vanaf de Nieuwe Merwede en is tijdens het vorige getij in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep gekomen. Aan de oevers van de Dordtsche Kil vindt nu sedimentatie plaats. De sedimentaanvoer vanuit de Nieuwe Merwede neemt toe.

Tijdens eb (figuur 2) is de grote stroming van sediment vanaf de Nieuwe Merwede naar de Dordtsche Kil nog steeds aanwezig. In de bocht tussen de Moerdijkbruggen en de Dordtsche Kil is sediment dat in het vorige deel van het getij is gesedimenteerd weer geërodeerd.

Tussen eb en vloed (figuur 3) vindt sedimentatie plaats in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep. De concentratie van sediment in het westelijk deel van het Hollandsch Diep is dan minimaal. De uitstroom van sediment vanuit de Dordtsche Kil naar het westelijk deel van het Hollandsch diep neemt toe.

Tijdens vloed (figuur 4) is de maximale uitstroom van sediment uit de Dordtsche Kil te zien. Deze uitstroom zorgt voor de sedimentatie in de zeevaartgeul en in het gedeelte ten noorden van de Sassenplaat. In figuur 4 is ook duidelijk te zien dat de instroom vanaf de Nieuwe Merwede tijdens vloed gering is.

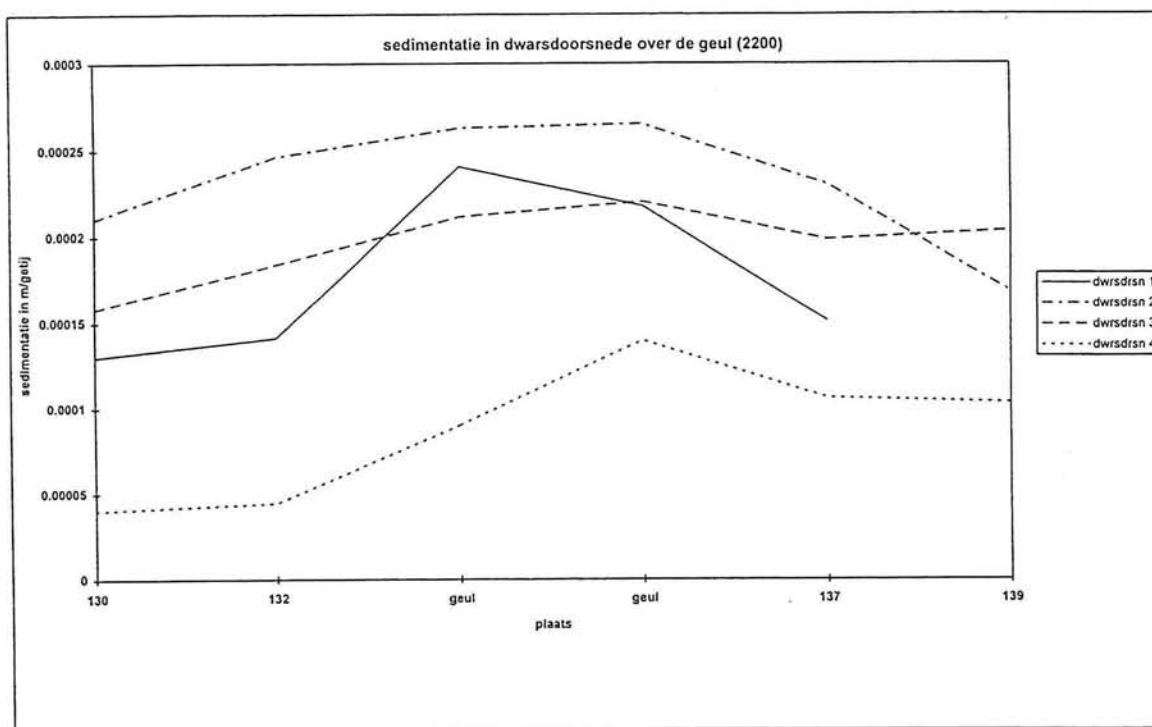
In figuur 8.2 is het verloop van de gemiddelde sedimentatie op een aantal tijdstippen in de geul getekend. Aan de linker zijde is de sedimentatie bij de monding van de Dordtsche Kil in het Hollandsch Diep getekend. In het midden van de figuur is de sedimentatie in de oversteek te zien. Aan de rechterzijde is de sedimentatie getekend zoals die is berekend voor het Zuid-Hollandsch Diep.



Figuur 8.2 Gemiddelde sedimentatie in de geul bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s

Tijdens de ijking van het model is geprobeerd om de maximale sedimentatie in het zuidelijk deel van de oversteek te laten plaatsvinden (midden van de figuur). In de monding van de Dordtsche Kil vindt soms erosie plaats (tussen eb en vloed en omgekeerd) en soms sedimentatie (tijdens eb of vloed). De sedimentatie in het Zuid Hollandsch Diep is gering bij een afvoer van 2200 m³/s. Voornamelijk tijdens hoge afvoeren vindt sedimentatie in het Zuid-Hollandsch Diep plaats (paragraaf 8.2 en 8.3).

In figuur 8.3 is de sedimentatie over een getij van een aantal dwarsprofielen getekend voor een Rijnafoer van 2200 m³/s.



Figuur 8.3 Sedimentatie dwarsprofielen bij een Rijnafoer van 2200 m³/s

Zoals in de figuur te zien is, bezinkt er in de geul meer sediment dan buiten de geul. In tabel 8.2 staat de verhouding tussen sedimentatie in en buiten de geul.

plaats	verhouding sedimentatie in/buiten geul
dwarsdoorsnede 1 (mond Zuid-Hollandsch Diep)	1,6
dwarsdoorsnede 2 (oude scheiding IHM-RWS)	1,2
dwarsdoorsnede 3 (midden Hollandsch Diep)	1,2
dwarsdoorsnede 4 (mond Dordtsche Kil)	1,6
gemiddeld	1,4

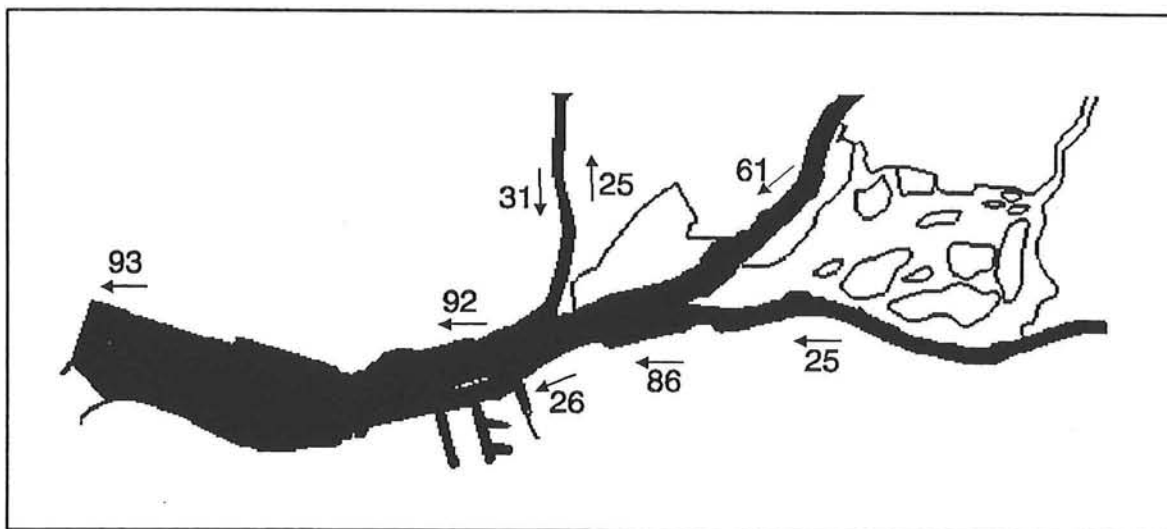
Tabel 8.2 Verhouding sedimentatie in de geul en buiten de geul bij een Rijnafoer van 2200 m³/s. In bijlage I.10 is de ligging van de dwarsdoorsneden in een figuur getekend

Gemiddeld sedimenteert er in het model bij een Rijnafoer van 2200 m³/s ongeveer 40% meer in de geul dan buiten de geul. In werkelijkheid is deze verhouding ongeveer 2 à 3 over alle Rijnafoeren.

8.2 Resultaten bij een Rijnaflow van 3500 m³/s

8.2.1 Waterbeweging bij een Rijnaflow van 3500 m³/s

De opening van de Haringvlietsluizen is bij hogere Rijnaflowen groter dan bij een gemiddelde Rijnaflow (2200 m³/s). Bij een Rijnaflow van 3500 m³/s is de opening ongeveer 844 m². Dit betekent dat de afvoer van water uit het Hollandsch Diep via het Haringvliet ook groter is. De rol van de Dordtsche Kil wordt daardoor kleiner dan bij een Rijnaflow van 2200 m³/s. De aanvoer vanaf de Nieuwe Merwede en de Amer is natuurlijk wel groter. In onderstaande figuur 8.4 zijn schematisch de eb- en vloedvolumes weergegeven. (gegevens uit berekening met WAQUA)



Figuur 8.4 Eb- en vloedvolumes 3500 m³/s nulalternatief (volumes in mln m³)

De volumes op de Nieuwe Merwede en de Amer zijn bijna verdubbeld t.o.v. een Rijnaflow van 2200 m³/s. Op de Nieuwe Merwede zijn ze van 38 miljoen m³ naar 61 miljoen m³ gegaan en op de Amer van 14 miljoen m³ naar 25 miljoen m³. Op de Dordtsche Kil is er bij een Rijnaflow van 2200 m³/s een netto *uitstroom* van 20 miljoen m³, terwijl bij een Rijnaflow van 3500 m³/s de netto *instroom* 6 miljoen m³ bedraagt. Daardoor is de uitstroom naar het Haringvliet verdrievoudigd, van 33 miljoen m³ naar 93 miljoen m³. Bovendien vindt er in het westelijk deel van het Hollandsch Diep alleen een westwaarts gerichte stroming op.

In bijlage VI.1.1 is het stroombeeld gedurende het getij te zien. Deze is overeenkomstig de stroming bij een Rijnaflow van 2200 m³/s. Tussen vloed en eb en tijdens eb stroomt water vanuit de Nieuwe Merwede via het oostelijk deel van het Hollandsch Diep de Dordtsche

Kil in. Tussen eb en vloed en tijdens vloed stroomt water vanuit de Dordtsche Kil het westelijk deel van het Hollandsch Diep op. Het enige verschil is dat de stroming in de Nieuwe Merwede, de Amer en het Hollandsch Diep groter is dan bij een Rijnafoer van 2200 m³/s.

In onderstaande tabel staan de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor de waterstand en de stroomsnelheid op diverse plaatsen in het gebied voor een Rijnafoer van 3500 m³/s

Waterstanden in m. boven NAP	minimum	gemiddeld	maximum
H-Moerdijk	0.15	0.37	0.61
H-Kop van het Land	0.41	0.60	0.80
H-Keizersveer	0.21	0.45	0.68
H-Dordtsche Kil	0.11	0.38	0.66
Stroomsnelheden in m/s	minimum	gemiddeld	maximum
U-Hollandsch Diep west	0.05	0.21	0.30
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.05	0.15	0.24
U-Oversteek	0.07	0.20	0.28
U-Hollandsch Diep oost	0.10	0.33	0.50
U-Mond Amer	0.01	0.13	0.22
U-Mond Nieuwe Merwede	0.24	0.37	0.43
U-Dordtsche Kil	0.05	0.68	1.19

Tabel 8.3 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstanden en stroomsnelheden bij een Rijnafoer van 3500 m³/s

H=waterstanden in m boven NAP

U=snelheden in m/s

8.2.2 Sedimentbeweging en sedimentatie bij een Rijnafoer van 3500 m³/s

In bijlage VI.1.2 is weergegeven hoe de concentratie van grof slib gedurende het getij in het bekken varieert. In bijlage VI.1.3 is de uiteindelijke sedimentatie over een getij gepresenteerd.

Wanneer de concentratie van de grof slibfractie bij een Rijnafoer van 3500 m³/s vergeleken wordt met de verspreiding bij een Rijnafoer van 2200 m³/s valt op dat de concentraties in het gebied veel hoger zijn bij een Rijnafoer van 3500 m³/s. Dit komt omdat de stroomsnelheden dan hoger zijn. Verder vertoont het concentratieverloop veel overeenkomsten.

Tijdens eb (figuur 2) is de concentratie in het westelijk deel van het Hollandsch Diep laag.

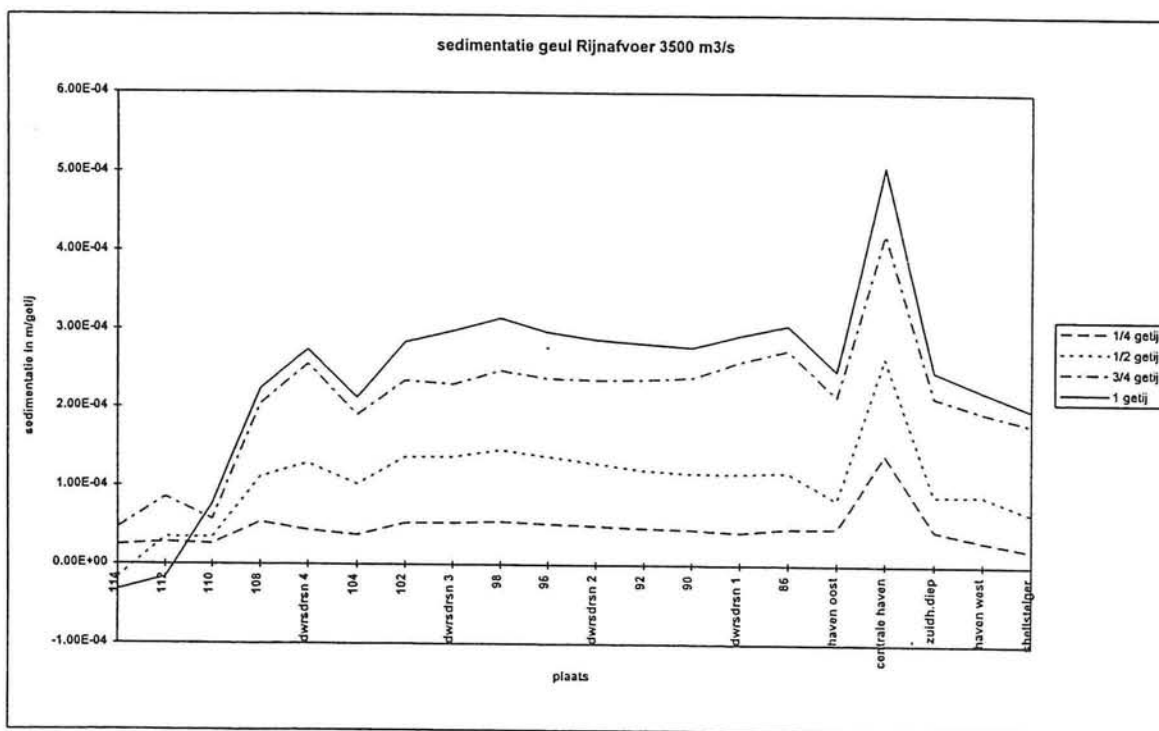
Bovendien stroomt dan veel sediment vanaf de Nieuwe Merwede via het oostelijk deel van het Hollandsch Diep naar de Dordtsche Kil. Tijdens vloed (figuur 4) stroomt een groot gedeelte ervan weer terug naar het westelijk deel van het Hollandsch Diep.

Het sedimentatiepatroon bij een Rijnaafvoer van 3500 m³/s is grillig. Op de Nieuwe Merwede en de Dordtsche Kil is sprake van erosie. In het oostelijk deel van het Hollandsch Diep vindt een grote sedimentatie plaats, vooral in het verlengde van de Nieuwe Merwede. In het westelijk deel vindt veel sedimentatie plaats buiten de geulen. Dit is in de ondiepe gedeelten en in de diepe gedeelten die niet tot de geulen behoren (mond havenbekkens, stortlokatie Cromstrijen). Dit komt met de werkelijkheid overeen.

In de diepe geulen vindt minder sedimentatie plaats. In werkelijkheid moet hier meer sedimenteren. De verklaring hiervoor is dat er in de diepere gedeelten een hogere stroomsnelheid staat dan in de ondiepe gedeelten ($U=C(Ri)^{1/2}$). Bij een hogere stroomsnelheid sedimenteert daardoor minder materiaal.

Aan de andere kant zorgen grote stroomsnelheden ook voor een grote hoeveelheid sediment die wordt aangevoerd. Hierdoor sedimenteert meer materiaal. In de modellering is de invloed van de hoge stroomsnelheid belangrijker geweest dan de daarbij behorende grotere aanvoer van sediment.

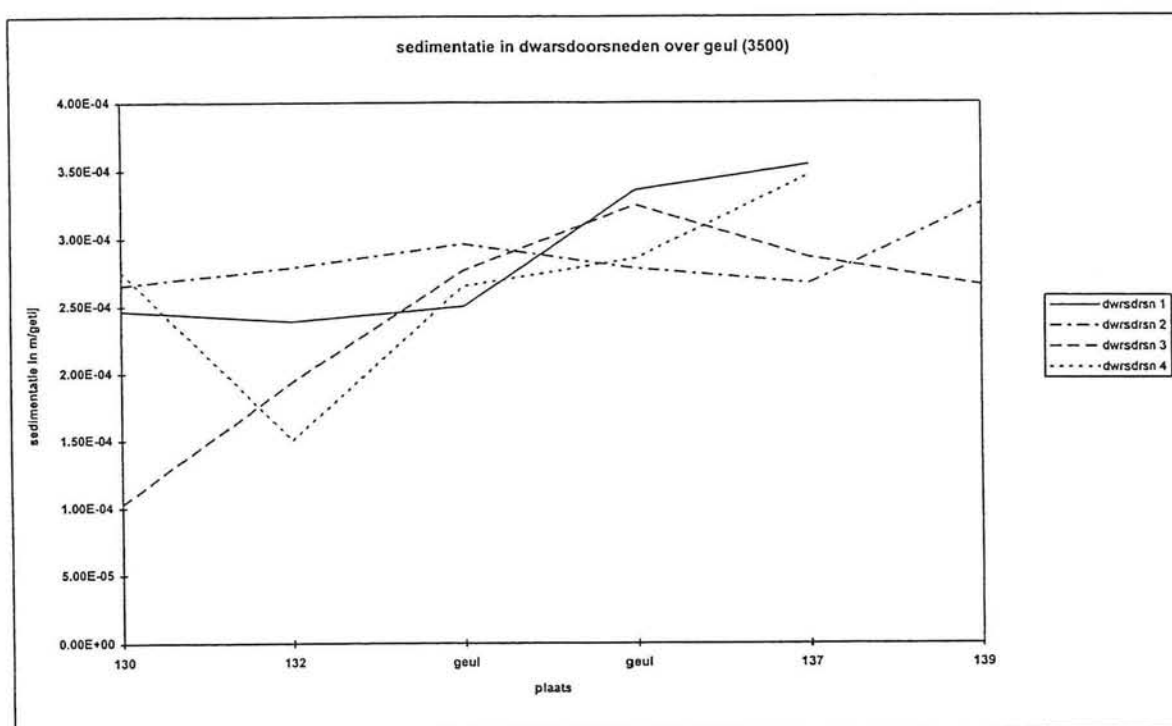
In figuur 8.5 is het verloop van de sedimentatie in de zeevaartgeul geschetst voor een aantal tijdstippen gedurende het getijde.



Figuur 8.5 Sedimentatie in de geul bij een Rijnaafvoer van 3500 m³/s in huidige situatie

In de oversteek sedimenteert gemiddeld 0,3 mm materiaal per getij. De piek bij de centrale haven wordt veroorzaakt doordat dit punt in de havenmonding ligt. In de havenmondingen is de sedimentatie bij hoge afvoeren vrij hoog. (0,5 mm à 0,6 mm)

Ook is bekeken wat het verschil was tussen de sedimentatie in de geul en buiten de geul. In onderstaande figuur is dit grafisch weergegeven.



Figuur 8.6 Sedimentatie in en buiten geul bij een Rijnaflow van 3500 m³/s

Bij een hoge afvoer is het verschil tussen de geul en de omgeving niet duidelijk aanwezig. Alleen midden in de oversteek is de sedimentatie in de geul hoger dan buiten de geul. In de zuidelijke dwarsdoorsneden is de sedimentatie aan de oever (punten 137 en 139) groter dan in de geul. Dit is ook het geval voor de noordelijke dwarsdoorsnede.

In onderstaande tabel is aangegeven hoe de verhouding van sedimentatie in en buiten de geul is.

plaats	verhouding sedimentatie in/buiten geul
dwarsdoorsnede 1 (mond Z.-Hollandsch Diep)	1,0
dwarsdoorsnede 2 (oude scheiding IHM-RWS)	1,0
dwarsdoorsnede 3 (midden Hollandsch Diep)	1,4
dwarsdoorsnede 4 (mond Dordtsche Kil)	1,1
gemiddeld	1,1

Tabel 8.4 Verhouding sedimentatie in de geul en buiten de geul bij een Rijnafvoer van 3500 m³/s en de huidige situatie

In bijlage I.10 is de ligging van de dwarsdoorsneden in een figuur getekend.

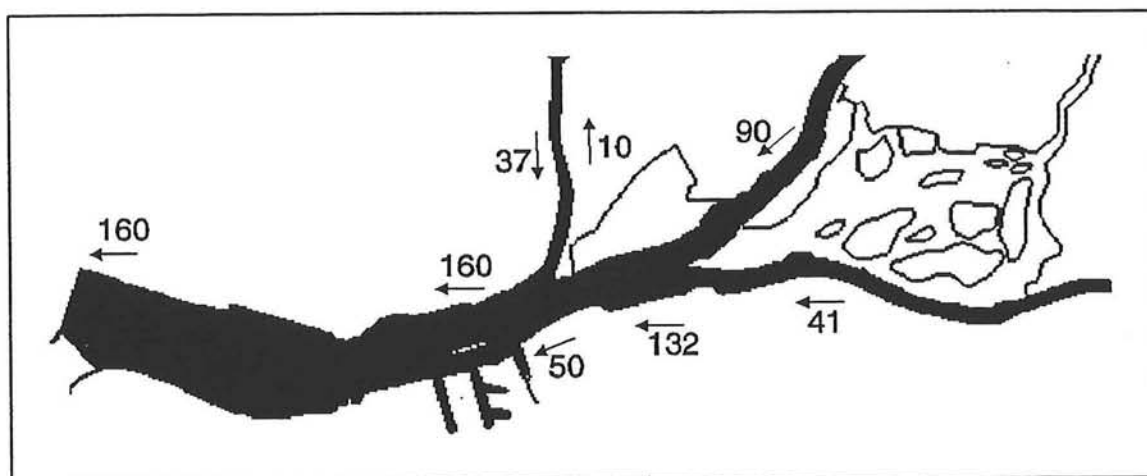
Gemiddeld sedimenteert er in het model bij een Rijnafvoer van 3500 m³/s ongeveer 10% meer sediment in de geul dan buiten de geul. In werkelijkheid is deze verhouding ongeveer 2 à 3 over alle Rijnafvoeren.

8.3 Resultaten bij een Rijnafvoer 5000 m³/s

8.3.1 Waterbeweging bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s

Bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s is de opening van de Haringvlietsluizen 1540 m² van de 6000 m². Door deze grote opening kan het water uit het Haringvliet en het Hollandsch Diep gemakkelijker naar zee stromen. Hieronder zijn schematisch de eb- en vloedvolumes weergegeven.

(gegevens uit berekening met WAQUA)



Figuur 8.7 Eb- en vloedvolumes voor een Rijnafvoer van 5000 m³/s bij de huidige situatie (volumes in mln m³)

De voornaamste stroming is van de Nieuwe Merwede en de Amer over het Hollandsch Diep naar het Haringvliet. De rol van de Dordtsche Kil wordt naarmate de Rijnafvoer toeneemt steeds kleiner en beïnvloedt nauwelijks meer de stroming. Van de 160 miljoen m³ die door het westelijk deel van het Hollandsch Diep stroomt, is 27 miljoen m³ afkomstig uit de Dordtsche Kil.

Dat de invloed van de Dordtsche Kil klein is blijkt ook uit het stroombeeld zoals dat in bijlage VII.1.1 is gepresenteerd.

In onderstaande tabel staan de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor de waterstand en de stroomsnelheid op diverse plaatsen in het gebied voor de huidige situatie en bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s.

Waterstanden in m. boven NAP	minimum	gemiddeld	maximum
H-Moerdijk	-0.02	0.30	0.66
H-Kop van het Land	0.58	0.78	1.01
H-Keizersveer	0.23	0.52	0.81
H-Dordtsche Kil	-0.01	0.34	0.71
Stroomsnelheden in m/s	minimum	gemiddeld	maximum
U-Hollandsch Diep west	0.14	0.36	0.46
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.11	0.29	0.38
U-Oversteek	0.16	0.3	0.54
U-Hollandsch Diep oost	0.20	0.51	0.77
U-Amer	0.04	0.21	0.34
U-Nieuwe Merwede	0.39	0.54	0.64
U-Dordtsche Kil	0.02	0.55	1.32

Tabel 8.5 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor de waterstand en de stroomsnelheden bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s en voor de huidige situatie (nulalternatief)

H: waterstand in m boven NAP

U: stroomsnelheid in m/s

Uit de waarden in de bovenstaande tabel valt op te maken dat het verhang in het gebied groter is dan bij lagere afvoeren. Dit leidt tot grotere stroomsnelheden.

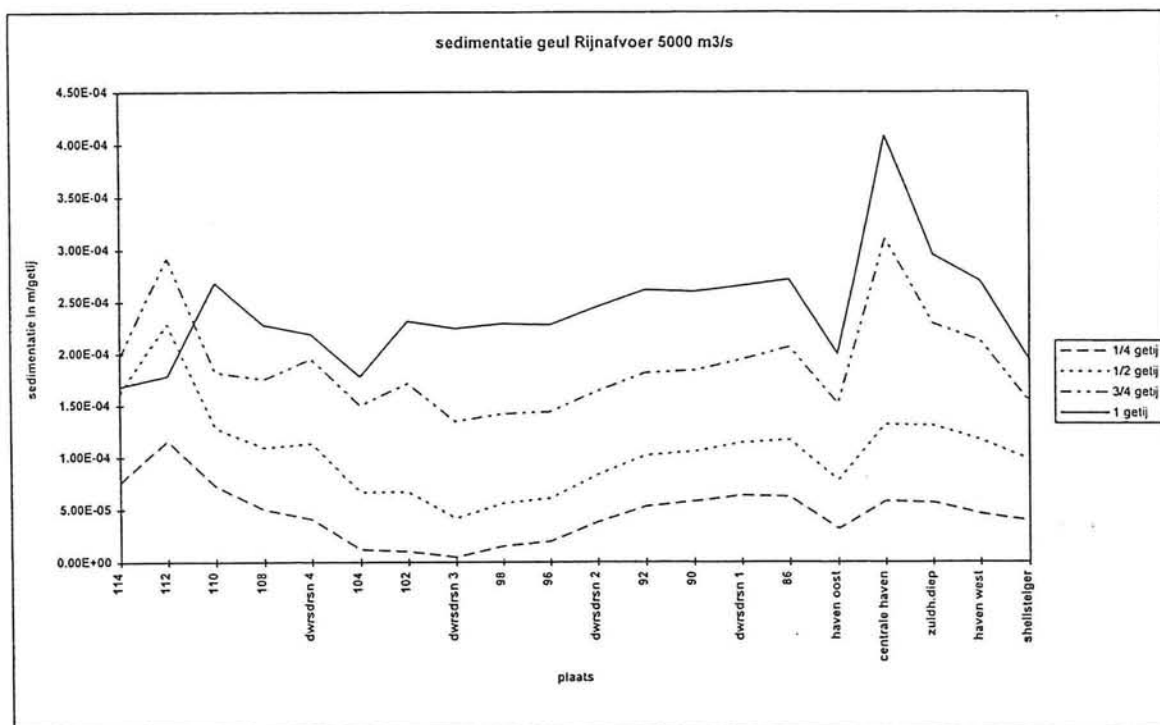
8.3.2 Sedimentbeweging en sedimentatie bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s

In bijlage VII.1.2 zijn de 4 stadia van bodemverschil gepresenteerd. Opmerkelijk is dat in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep tussen vloed en eb (figuur 1) erosie optreedt. Tussen eb en vloed (figuur 3) en tijdens vloed (figuur 4) treedt er sedimentatie op.

Op de Nieuwe Merwede is de bodem gedurende het gehele getij aan het eroderen. In het westelijk deel van het Hollandsch Diep sedimenteert gedurende het hele getij materiaal.

Net als bij een afvoer van 3500 m³/s sedimenteert veel materiaal in de havenmondingen en op de stortlokatie Cromstrijen. Ook is de sedimentatie in de luwte van de Sassenplaat duidelijk te zien. In de diepe geulen sedimenteert minder omdat de watersnelheid hier groter is dan in de ondiepe delen.

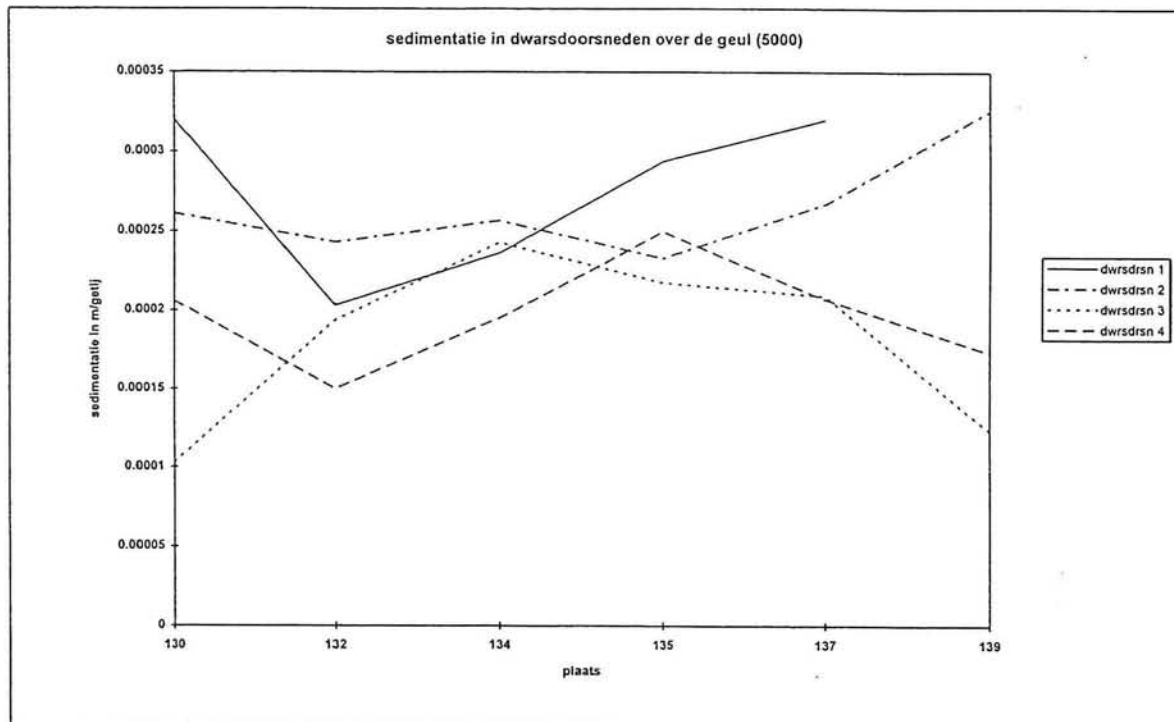
In figuur 8.8 is het sedimentatieverloop bij een Rijnaafvoer van 5000 m³/s voor verschillende tijdstappen in de geul getekend.



Figuur 8.8 Sedimentatie in de geul bij een Rijnaafvoer van 5000 m³/s

Bij de lagere afvoeren kwam netto erosie op de Dordtsche Kil voor, nu vindt er netto sedimentatie plaats. De gemiddelde sedimentatie in de oversteek is ongeveer 0,25 mm per getij. De piek bij de centrale haven wordt veroorzaakt doordat dit punt in de haveningang ligt, waar bij een hoge afvoer veel sedimenteert.

In onderstaande figuur is de sedimentatie in enkele dwarsdoorsneden over het profiel getekend.



Figuur 8.9 Sedimentatie dwarsdoorsneden bij een Rijnaflow van 5000 m³/s

Vooraf in de 2 dwarsdoorsneden aan de zuidkant (1 en 2) is de verhouding scheef. In de omgeving sedimenteert meer dan in geul zelf. Dit komt omdat in de omgeving de watersnelheid minder groot is dan in de geul zelf.

In onderstaande tabel zijn de verhoudingen van sedimentatie in en buiten de geul weergegeven.

plaats	verhouding sedimentatie in/buiten geul
dwarsdoorsnede 1 (mond Z.-Hollandsch Diep)	0,94
dwarsdoorsnede 2 (oude scheiding IHM/RWS)	0,89
dwarsdoorsnede 3 (midden Hollandsch Diep)	1,5
dwarsdoorsnede 4 (mond Dordtsche Kil)	1,2
gemiddeld	1,1

Tabel 8.6 Verhouding sedimentatie in en buiten de geul bij een Rijnaflow van 5000 m³/s
In bijlage I.10 is de ligging van de dwarsdoorsneden in een figuur getekend.

In de geul sedimenteert bij een Rijnaflow van 5000 m³/s 10 % meer sediment dan buiten de geul. In werkelijkheid sedimenteert ongeveer 2 à 3 keer zoveel sediment in de geul dan buiten de geul.

8.4 Uiteindelijke sedimentatie in de huidige situatie

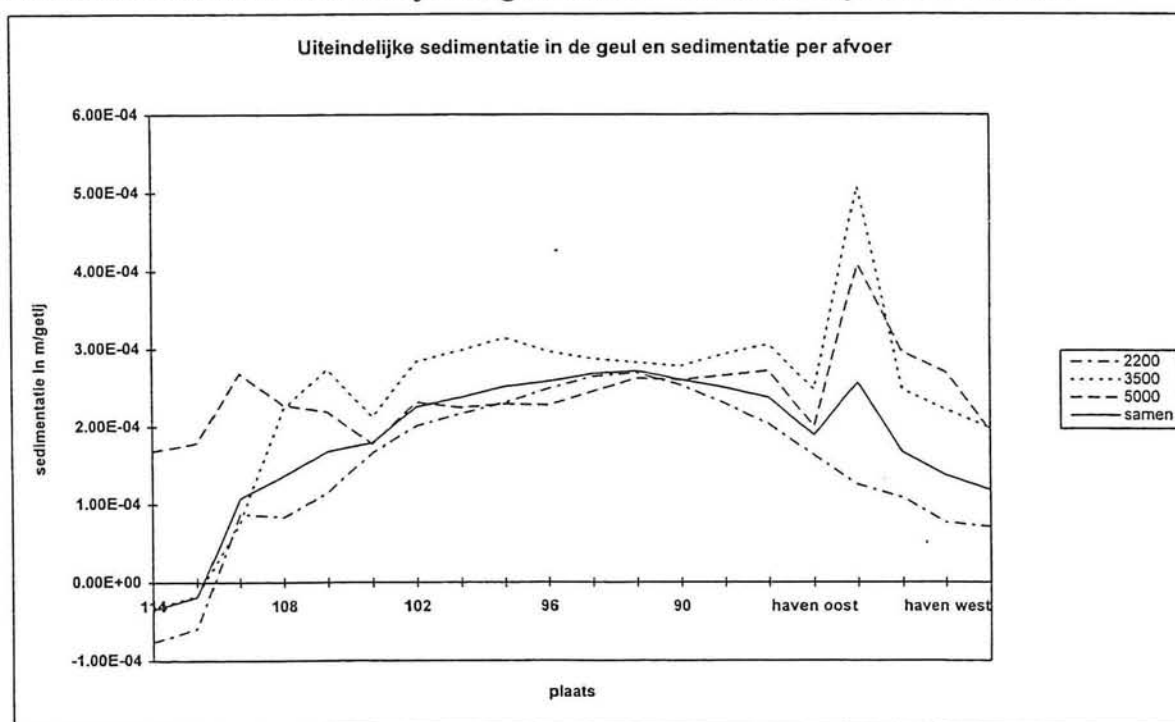
Om de resultaten van de drie voorgaande paragrafen te kunnen combineren, moet aan elk resultaat een bepaald gewicht worden toegekend zodat de resultaten bij elkaar opgeteld kunnen worden.

Gekozen is om de kans van overschrijding van elke afvoer als gewicht voor de resultaten van de drie gebruikte afvoeren te nemen. Zodoende kunnen de resultaten bij elkaar opgeteld worden om tot een uiteindelijke sedimentatie te komen. In tabel 8.7 zijn deze kansen weergegeven.

Rijnafvoer	kans van overschrijding	gewicht
2200 m ³ /s	50 %	5/8
3500 m ³ /s	20 %	2/8
5000 m ³ /s	10 %	1/8

Tabel 8.7 Kans van overschrijding en gewichten resultaten sedimentatie

In figuur 8.10 zijn de resultaten gepresenteerd van de sedimentatie in de geul bij Rijnafvoeren van 2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s. Ook is in de figuur de uiteindelijke sedimentatie in de geul getekend. Doordat de resultaten van de gemiddelde Rijnafvoer (2200 m³/s) zwaarder tellen dan die van hogere Rijnafvoeren lijkt de uiteindelijke sedimentatie hier het meest op. De maximale sedimentatie in het zuidelijk deel van de oversteek is daarom ook duidelijk terug te vinden in de uiteindelijke sedimentatie.



Figuur 8.10 Sedimentatie in de geul per afvoer apart en gezamenlijk

In figuur 8.10 is te zien dat de hogere afvoeren de gemiddelde sedimentatie geleidelijker laten verlopen dan de sedimentatie bij de gemiddelde afvoer. De gemiddelde sedimentatie is ongeveer 0,24 mm per getij. In werkelijkheid is de gemiddelde sedimentatie 0,42 mm per getij.

Voor verschillende punten in het gebied zijn in tabel 8.8 de sedimentatie voor de drie Rijnafoeren en de uiteindelijk sedimentatie vermeld.

plaats	2200 m ³ /s	3500 m ³ /s	5000 m ³ /s	sed per gety	sed per jr
Haringvlietbrug	0,033	0,132	0,173	0,075	0,052 m
Hollandsch Diep west	0,191	0,233	0,326	0,218	0,153 m
Hollandsch Diep Sas.pl.	0,235	0,266	0,203	0,238	0,167 m
Dordtsche Kil	-0,428	-0,288	-0,186	-0,362	-0,255 m
Hollandsch Diep oost	0,164	0,293	0,122	0,191	0,134 m
Nieuwe Merwede mond	0,256	0,274	0,022	0,231	0,163 m
Nieuwe Merwede rand	0,261	-0,143	-0,398	0,077	0,054 m
dwarsdoorsnede 1 (mond Zuid-Hol.Diep)	0,229	0,293	0,265	0,250	0,176 m
dwarsdoorsnede 2 (grens)	0,264	0,287	0,245	0,268	0,188 m
dwarsdoorsnede 3 (Hol.Diep-midden)	0,216	0,298	0,224	0,246	0,172 m
dwarsdoorsnede 4 (Hol.Diep-noord)	0,115	0,273	0,219	0,202	0,142 m

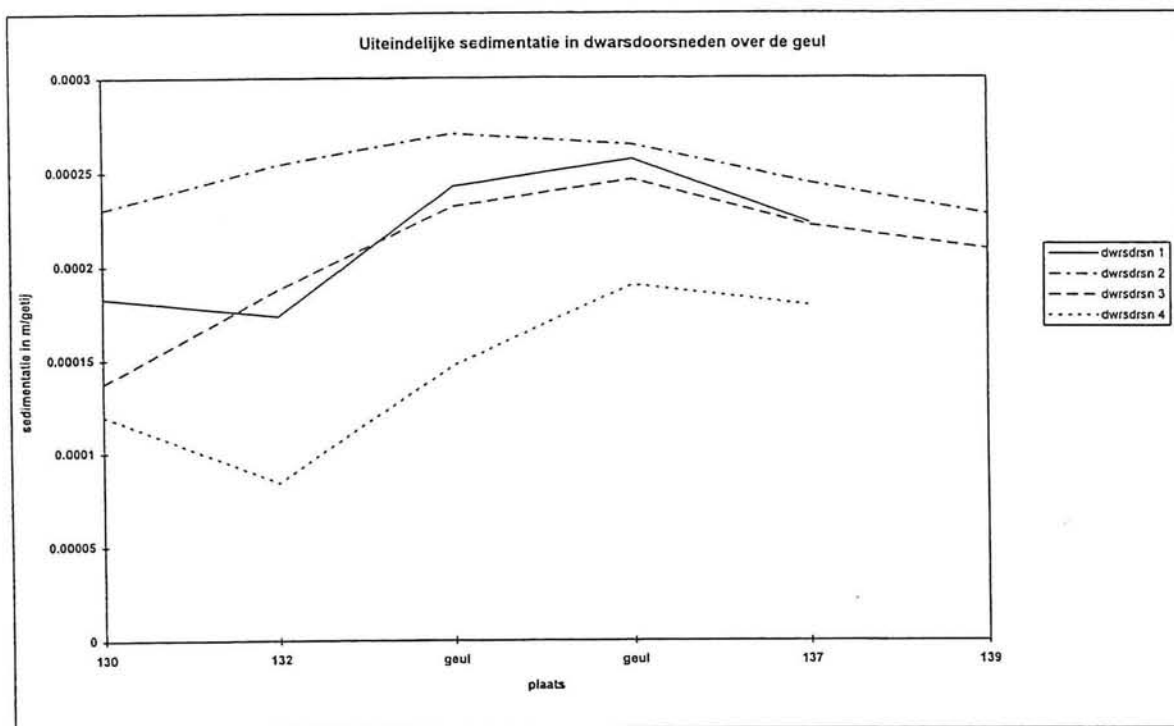
Tabel 8.8 Sedimentatie in mm per getij op punten in gebied; waarden in mm bodemverschil

De bovenste 7 plaatsen liggen verspreid in het gebied

De onderste 4 plaatsen liggen in de oversteek/ zeevaartgeul

In bijlage I.10 is de ligging van de meeste punten in een figuur getekend

In figuur 8.11 is de sedimentatie in enkele dwarsprofielen over de geul getekend voor de uiteindelijke sedimentatie. Dit geeft het verschil tussen de sedimentatie in en buiten de geul weer.



Figuur 8.11 Uiteindelijke sedimentatie in en buiten de geul

In tabel 8.9 is het verschil per dwarsdoorsnede aangegeven.

plaats	verhouding sedimentatie in/buiten geul
dwarsdoorsnede 1 (mond Z.-Hollandsch Diep)	1,3
dwarsdoorsnede 2 (oude scheiding IHM/RWS)	1,1
dwarsdoorsnede 3 (midden Hollandsch Diep)	1,3
dwarsdoorsnede 4 (mond Dordtsche Kil)	1,3
gemiddeld	1,2

Tabel 8.9 Verhouding uiteindelijke sedimentatie in en buiten geul

In bijlage I.10 is de ligging van de dwarsdoorsneden in een figuur getekend

In de geul sedimenteert dus ongeveer 20 % meer sediment dan direct naast de geul.

8.5 Conclusies

De sedimentatie in de geul ligt voor het model ongeveer twee keer zo laag (0,17 m/jaar) als voor de werkelijke geul (0,20 à 0,30 m/jaar). Dit komt waarschijnlijk doordat het grid te groot is genomen, waardoor de oversteek niet goed gemodelleerd is. De sedimentatie buiten de geul is iets hoger dan in werkelijkheid. Zoals in paragraaf 7.5.2 al vermeld, is bij de ijking van het model meer gekeken naar de sedimentatie-patronen in het hele gebied dan naar de feitelijke sedimentatie in de geul in vergelijking tot die in de werkelijkheid. Ook zijn bepaalde processen niet goed genoeg gemodelleerd zoals de modellering van het zandtransport en bodemtransport. Bovendien zijn ook een aantal processen die in werkelijkheid wel optreden, niet gemodelleerd. Dit zijn bijvoorbeeld de invloed van oevererosie, wind en scheepvaartbewegingen. Met turbulentie wordt indirect rekening gehouden in de bodemwrijving en valsnelheid, maar deze invloed is slechts marginaal. De resultaten van dit onderzoek moeten daarom niet gedetailleerd bekeken worden, maar geven slechts een indicatie van de sedimentatie/erosie in een groter gebied. Dit gegeven heb ik ook gebruikt bij de ijking van het model.

Zo is geprobeerd de maximale sedimentatie in de geul ter plaatse van dwarsdoorsnede 2 te krijgen. Ook is getracht het verschil tussen wat in de geul sedimenteert en wat naast de geul sedimenteert, zo groot mogelijk te laten zijn. Daarbij was met name het feit dat bij hoge afvoeren de sedimentatie bij de oevers naast de zeevaartgeul groot was een nadeel. Op de Nieuwe Merwede mocht bij de gecumuleerde resultaten geen sedimentatie of erosie plaatsvinden, omdat dit in werkelijkheid ook niet plaatsvindt. Uit de berekeningen kwam een netto sedimentatie van 0,05 m/jaar.

De Dordtsche Kil erodeert in het model met een snelheid van 0,25 m/jaar. In werkelijkheid is dit 0,15 m/jaar. Op het Hollandsch Diep was de gemiddelde sedimentatie uit de berekeningen 0,13 à 0,18 m per jaar. In werkelijkheid ligt dit rond de 0,1 m per jaar. In het middendeel en in het oostelijk deel vindt sedimentatie plaats in het hele gebied, in het westelijk deel alleen in de diepe gedeelten. Dit is in werkelijkheid ook het geval.

De sedimentatie in de oversteek verloopt vrij gelijkmatig met een maximum bij de oude scheidslijn tussen het gebied dat door het IHM onderhouden wordt en het gebied dat door Rijkswaterstaat onderhouden wordt. De grootste sedimentatie treedt op in de zeevaartgeul en het Hollandsch Diep ten noorden van de Sassenplaat.

Bij hoge afvoeren sedimenteert veel materiaal in de havenmondingen van het IHM en achter de Sassenplaat. Dit komt overeen met de werkelijkheid.

9 Resultaten van de berekening van de HV2-min variant en de verdiepte geul

9.1 Resultaten bij de HV2-min variant

De HV2-min variant is één van de varianten die bekeken wordt in het kader van de MER-beheer Haringvlietsluizen. De bedoeling van deze MER is om te onderzoeken wat de effecten van een gedeeltelijk open Haringvliet zullen zijn op de natuur, de water- en zoutbeweging en de sedimentatie in de hele Zuidrand en de Voordelta. In paragraaf 4.3 zijn de MER-beheer Haringvlietsluizen en alle varianten nader beschreven.

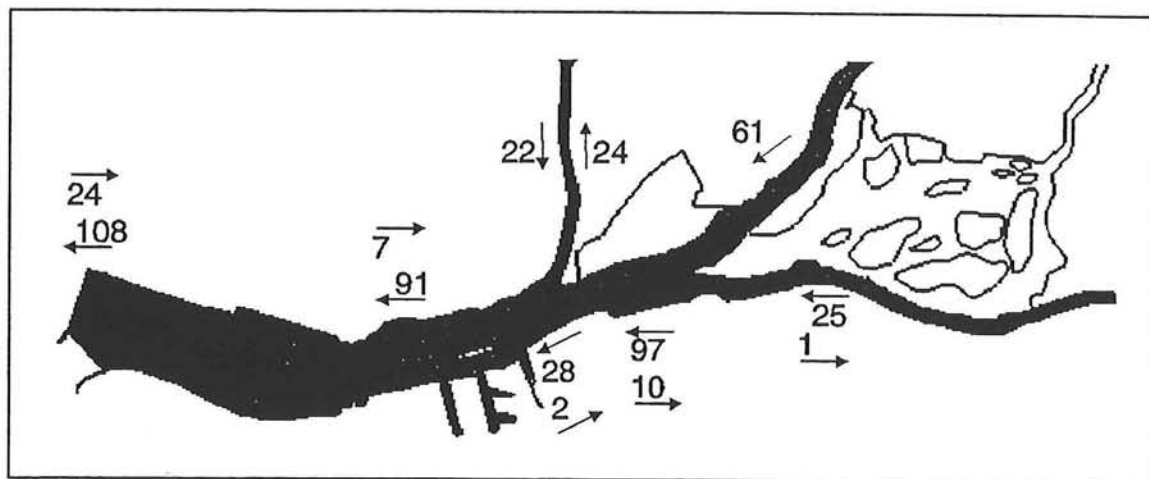
9.1.1 Waterbeweging bij de HV2-min variant

In bijlage VI.2.1 is voor de HV2-min variant de opening van de Haringvlietsluizen tegen de hoogte van de Rijnafoer uitgezet (uit Bol, 1993). In deze figuur is te zien dat bij een Rijnafoer van 5000 m³/s is er geen verandering met de huidige situatie. De opening van de Haringvlietsluizen bij een Rijnafoer van 2200 m³/s is 900 m² bij een eb- en vloedstroming. Echter bij een Rijnafoer die kleiner is dan 2000 m³/s is er geen verandering met de huidige situatie. De nieuwe situatie bij een Rijnafoer van 2200 m³/s is daarom niet meer representatief voor de lage en gemiddelde Rijnafoeren. Ervoor gekozen is om de situatie bij een Rijnafoer van 2200 m³/s niet verder te onderzoeken maar om alleen de situatie bij een Rijnafoer van 3500 m³/s te bekijken. Bij een Rijnafoer van 3500 m³/s is de opening zowel bij een eb- als bij een vloedstroom 1200 m². In het huidige beheer is de opening alleen bij ebstroom 900 m² voor een Rijnafoer van 3500 m³/s.

Een grotere opening en vooral een continue opening is bedoeld om een grotere uitwisseling van waterhoeveelheden te krijgen. Hierdoor wordt het getijdeverschil groter en zullen ook de stroomsnelheden groter worden. Er zal meer water tijdens eb naar de Noordzee stromen. Tijdens vloed zal meer water het Haringvliet instromen. Hierdoor ontstaat een geleidelijke overgang in het zoutgehalte.

In het onderzoek zijn de bovenafvoeren en de getijbeweging op de Noordzee hetzelfde gelaten. Met het programma ZWENDL zijn de randvoorwaarden voor de randen van het tweedimensionale horizontale model opnieuw berekend. In bijlage VI.2.2 zijn deze gepresenteerd.

Uit de berekening met het tweedimensionale horizontale model zijn de getijvolumes als aangegeven in fig. 9.1 voortgekomen. (gegevens uit berekening met WAQUA)



Figuur 9.1 Getijvolumes HV2-min variant (Rijnafoer 3500 m³/s) (volumes in mln m³)

Tussen de volumes voor de HV2-min variant en die voor de huidige situatie is geen groot verschil. In de nieuwe situatie zal er netto een kleiner debiet door het Haringvliet afgevoerd worden dan in de huidige situatie (84 miljoen m³ i.p.v. 93 miljoen m³).

Dit komt omdat de bovenafvoeren gelijk blijven en de invloed van de Dordtsche Kil niet groot is bij een Rijnafoer van 3500 m³/s. In de huidige situatie zorgt de Dordtsche Kil netto voor een toevoer van water (6 miljoen m³). In de nieuwe situatie zal de Dordtsche Kil een nagenoeg gelijk eb- en vloedvolume hebben.

Hoewel de volumes niet veel verschillen, is er wel een duidelijk verschil in stroomsnelheden en waterstanden. In de huidige situatie is de stroming continu westwaarts gericht. Bij gebruik van de HV2-min variant zal de stroming tussen eb en vloed ook oostwaarts gericht zijn. Dit horizontale getij is dan zelfs op de Amer aanwezig. In bijlage VI.2.3 is een overzicht van de stroombeelden gedurende het getij gegeven. Vergeleken met het huidige stroombeeld heeft de Dordtsche Kil met de HV2-min variant minder invloed op het stroombeeld.

In tabel 9.1 staan de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor de waterstanden en de stroomsnelheden op diverse plaatsen in het gebied.

	HV 2-min variant (3500 m ³ /s)			huidige situatie (3500 m ³ /s)		
Waterstanden in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	0.10	0.48	0.85	0.15	0.37	0.61
H-Kop van het Land	0.39	0.71	1.03	0.41	0.60	0.80
H-Keizersveer	0.15	0.59	0.97	0.21	0.45	0.68
H-Dordtsche Kil	0.07	0.48	0.90	0.11	0.38	0.66
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Hollandsch Diep west	0.00	0.23	0.38	0.05	0.21	0.30
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.00	0.18	0.30	0.05	0.15	0.24
U-Oversteek	0.00	0.26	0.46	0.07	0.20	0.28
U-Hollandsch Diep oost	0.00	0.39	0.63	0.10	0.33	0.50
U-Amer	0.00	0.20	0.29	0.01	0.13	0.22
U-Nieuwe Merwede	0.03	0.35	0.47	0.24	0.37	0.43
U-Dordtsche Kil	0.00	0.54	0.89	0.00	0.68	1.19

Tabel 9.1 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstand en stroomsnelheden met de HV2-min variant en de huidige situatie bij een Rijnafvoer van 3500 m³/s

H: waterstand in m boven NAP

U: stroomsnelheid in m/s

Uit bovenstaande tabel blijkt dat bij de HV2-min variant het getijverschil toeneemt. Bij Moerdijk neemt deze van 0,46 m in de huidige situatie toe tot 0,75 m bij de HV2-min variant. Ook nemen de stroomsnelheden toe, vooral ter plaatse van de oversteek. In bijlage VI.2.4 zijn voor enkele punten de waterstanden en debieten gedurende het getij gegeven.

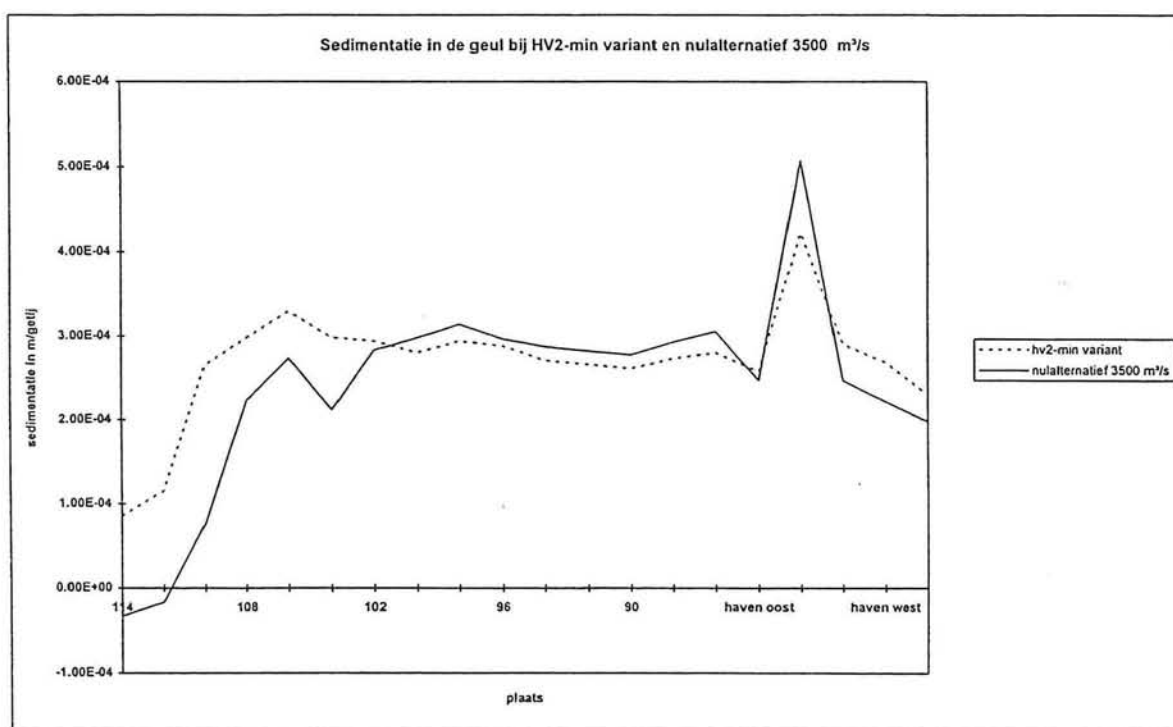
9.1.2 Sedimentbeweging en sedimentatie bij de HV2-min variant

In paragraaf 9.1.1 is te lezen dat de stroomsnelheden en debieten vergeleken met de huidige situatie bij de HV2-min variant hoger zijn. Dit heeft ook gevolgen voor de sedimentbeweging en de sedimentatie in het gebied. In bijlage VI.2.5 is de uiteindelijke sedimentatie over een getij weergegeven. Deze sedimentatie is verminderd, vergeleken met de sedimentatie die in de huidige situatie optreedt. In het hele Hollandsch Diep is de sedimentatie afgenomen of verspreid. Op de Dordtsche Kil en in de Nieuwe Merwede is de erosie afgenomen en is meer sedimentatie opgetreden dan in de huidige situatie.

Ter plaatse van de zeevaartgeul is de situatie iets anders. In het noordelijk gedeelte neemt de sedimentatie iets toe. Dit komt omdat in de monding van de Dordtsche Kil de

stroomsnelheden lager zijn waardoor er meer materiaal kan sedimenteren en minder materiaal erodeert. In de rest van de zeevaartgeul is de sedimentatie wel lager dan bij de huidige situatie. In het Zuid-Hollandsch Diep sedimenteert ondanks de hogere stroomsnelheden toch meer materiaal dan in de huidige situatie. Dit is voornamelijk zand dat in de huidige situatie vooral in het noordelijk deel van de Hollandsch Diep sedimenteert.

In figuur 9.2 is het verloop van de sedimentatie in de geul getekend. Hierin is ook te zien dat de sedimentatie in het middengedeelte van de geul iets is afgenomen t.o.v van de huidige situatie.



Figuur 9.2 Sedimentatie in de geul bij de HV2-min variant

Een volledig overzicht van de sedimentatie op de verschillende plaatsen in het gebied is in tabel 9.2 gegeven.

plaats	2200 m ³ /s	3500 m ³ /s	5000 m ³ /s	sed per gety	sed per jr
Haringvlietbrug	0,033	0,044	0,173	0,053	0,037 m
Hollandsch Diep west	0,191	0,183	0,326	0,205	0,145 m
Hollandsch Diep Sassenpl	0,235	0,264	0,203	0,238	0,167 m
Dordtsche Kil	-0,428	-0,103	-0,186	-0,320	-0,223 m
Hollandsch Diep oost	0,164	0,224	0,122	0,173	0,122 m
Nieuwe Merwede mond	0,256	0,253	0,022	0,231	0,163 m
Nieuwe Merwede rand	0,261	-0,102	-0,398	0,087	0,061 m
dwarsdoorsnede 1 (mond Zuid-Hol.Diep)	0,229	0,273	0,265	0,241	0,170 m
dwarsdoorsnede 2 (grens)	0,264	0,270	0,245	0,263	0,186 m
dwarsdoorsnede 3 (Hol.Diep-midden)	0,216	0,280	0,224	0,249	0,175 m
dwarsdoorsnede 4 (Hol.Diep-noord)	0,115	0,329	0,219	0,221	0,155 m

Tabel 9.2 Sedimentatie voor HV2-min variant per getij op punten in gebied; waarden in mm bodemverschil

In bijlage I.10 is de ligging van de meeste punten in een figuur getekend

De gemiddelde waarden zijn ten opzichte van de waarden in tabel 8.8 iets afgenomen. De invloed op de uiteindelijke sedimentatie bij een ander spuibeheer is niet zo heel groot. De sedimentatie bij een Rijnafvoer van 3500 m³/s bedraagt namelijk maar 25% van de uiteindelijke sedimentatie. De sedimentatie voor Rijnafvoeren van 2200 m³/s en 5000 m³/s blijft gelijk omdat voor deze afvoeren het stroombeeld en dus de sedimentatie niet verandert bij de HV2-min variant.

9.2 Resultaten bij de verdiepte geul

In de toekomst wil men het IHM bereikbaar maken voor grotere schepen. Dit betekent dat de bodemligging van de geul van NAP -8,50 m. naar NAP -9,30 m. gaat (zie paragraaf 2.5).

In het model ligt de geul gemiddeld op NAP -8,50 m. met uitschieters naar NAP -9,80 m. in de noordelijke deel van de geul.

9.2.1 Modellerings van de verdiepte geul

Eerdere resultaten wezen erop dat de modellering nog niet perfect was. Eén van de oorzaken hiervan kan de gebruikte bodemschematisatie zijn.

De geul is in het diepste gedeelte 150 meter breed, dit is ook de vaarbreedte voor de grootste schepen. Met taluds erbij is de totale breedte ongeveer 250 à 300 meter.

Omdat de gebruikte gridgrootte 100 meter is, bestaat de kans dat de modellering onnauwkeurig is ter plaatse van de zeevaartgeul. Dit kan leiden tot foutieve resultaten.

Bij het onderzoek naar de effecten van een verdiepte geul heb ik daarom geprobeerd om het effect van de gridgrootte te doorgronden. Op twee manieren is tijdens dit project hier onderzoek naar gedaan: in één proef is de diepte van de geul gevarieerd en in een tweede proef is de breedte van de verdiepte geul gevarieerd. Bij een verdieping van de geul zal de sedimentatie moeten toenemen. Als dit niet het geval is dan is de geul te onnauwkeurig gemodelleerd.

In een tweede proef is breedte van de geul gevarieerd en is met twee verschillende modelleringen voor een verdiepte geul gewerkt. In werkelijkheid is de geul 150 meter breed. De sedimentatie in de geul zal tussen die van een geul van 100 meter breed en die van een geul van 200 meter breed liggen. Op deze manier kan de invloed van de gridgrootte en de diepte van de segmenten achterhaald worden.

Bij het onderzoek naar de sedimentatie in de verdiepte geul is dus gerekend met twee modellen: een model met een verdiepte geul van 100 meter breed en een model met een verdiepte geul van 200 meter breed.

De verdieping is aangebracht in het deel van de geul tussen de monding van de oostelijke haven en de monding van de Dordtsche Kil (de oversteek). Op plaatsen waar de geul dieper was dan NAP -9,50 m. zijn de diepere waarden aangenomen. Met het eerste model zijn sommen gemaakt met de drie Rijnafoeren (2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s) die ook voor het nulalternatief gebruikt zijn.

9.2.2 Waterbeweging bij de verdiepte geul

Met de modellering van de geul van 100 m. breedte zijn berekeningen gemaakt met Rijnafoeren van 2200 m³/s, 3500 m³/s en 5000 m³/s. De modellering van de geul van 200 m. breedte is alleen gebruikt voor de Rijnafoer van 2200 m³/s.

De resultaten van de berekening van de waterbeweging met de modellering van de 100 m. en 200 m. brede geul waren identiek aan de resultaten van de berekening met de modellering van de bestaande geul. De ingreep is te klein om van invloed te zijn op de waterbeweging.

In tabel 9.3 zijn de waarden voor de verdiepte geul voor de Rijnafvoer van 2200 m³/s te zien.

	verdiepte geul 200 m. breed			huidige situatie (nulalternatief)		
Waterstand in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	0.41	0.55	0.67	0.41	0.54	0.67
H-Kop van het Land	0.48	0.63	0.76	0.48	0.63	0.76
H-Keizersveer	0.42	0.57	0.72	0.42	0.57	0.72
H-Dordtsche Kil	0.32	0.50	0.71	0.32	0.50	0.71
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Hollandsch Diep west	0.01	0.08	0.20	0.00	0.08	0.20
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.00	0.06	0.15	0.00	0.06	0.15
U-Oversteek	0.01	0.07	0.19	0.02	0.07	0.19
U-Hollandsch Diep oost	0.02	0.19	0.31	0.02	0.19	0.31
U-Amer	0.00	0.08	0.14	0.00	0.07	0.14
U-Nieuwe Merwede	0.11	0.22	0.27	0.11	0.22	0.27
U-Dordtsche Kil	0.04	0.78	1.03	0.04	0.78	1.02

Tabel 9.3 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstand en stroomsnelheden met de huidige geul en de geul die over 200 meter breedte op NAP -9,50 m. ligt (bij een Rijnafvoer 2200 m³/s)

H: waterstand in m boven NAP

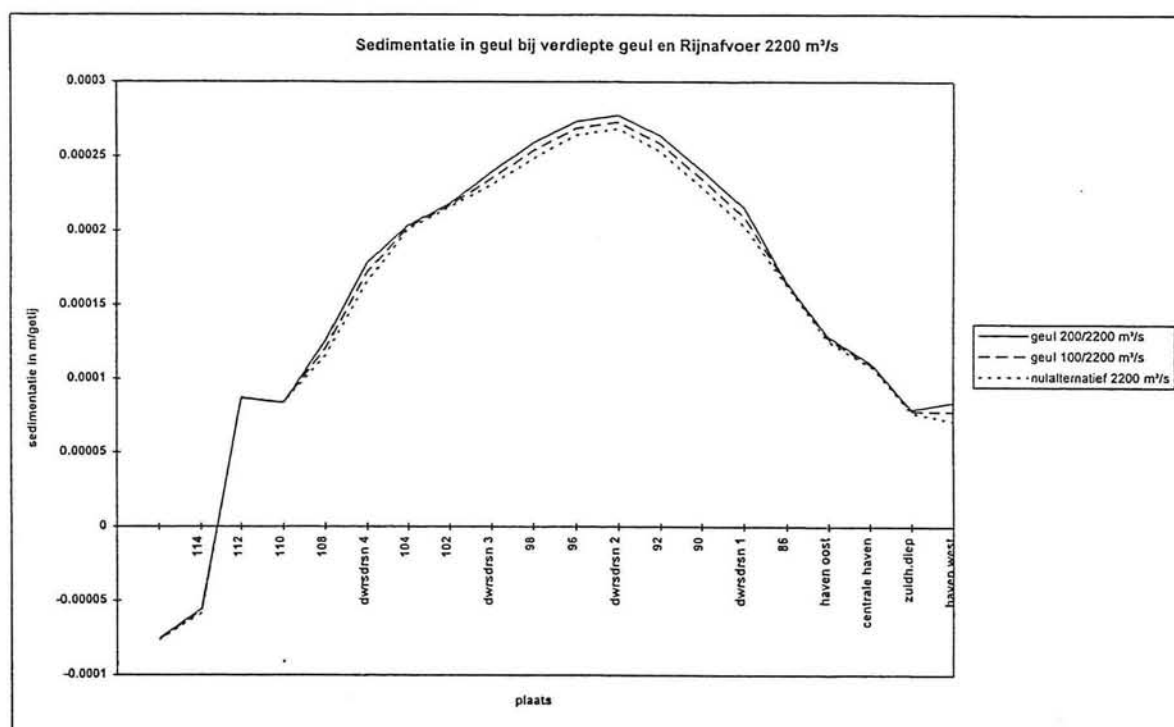
U: stroomsnelheid in m/s

In tabel 9.3 is duidelijk te zien dat de waterbeweging nauwelijks wordt beïnvloed door een verdiepte geul. In bijlage V.2.1 zijn de stroomsnelheden en waterstanden op een aantal plaatsen in het gebied getekend. Duidelijk te zien is dat er nauwelijks verschil is met de huidige situatie.

De waterbeweging is ook met de modellering van een enkele geul voor Rijnafvoeren van 3500 m³/s en 5000 m³/s berekend. Bij hogere afvoeren is er helemaal geen verschil tussen de situatie met de verdiepte geul en de huidige situatie.

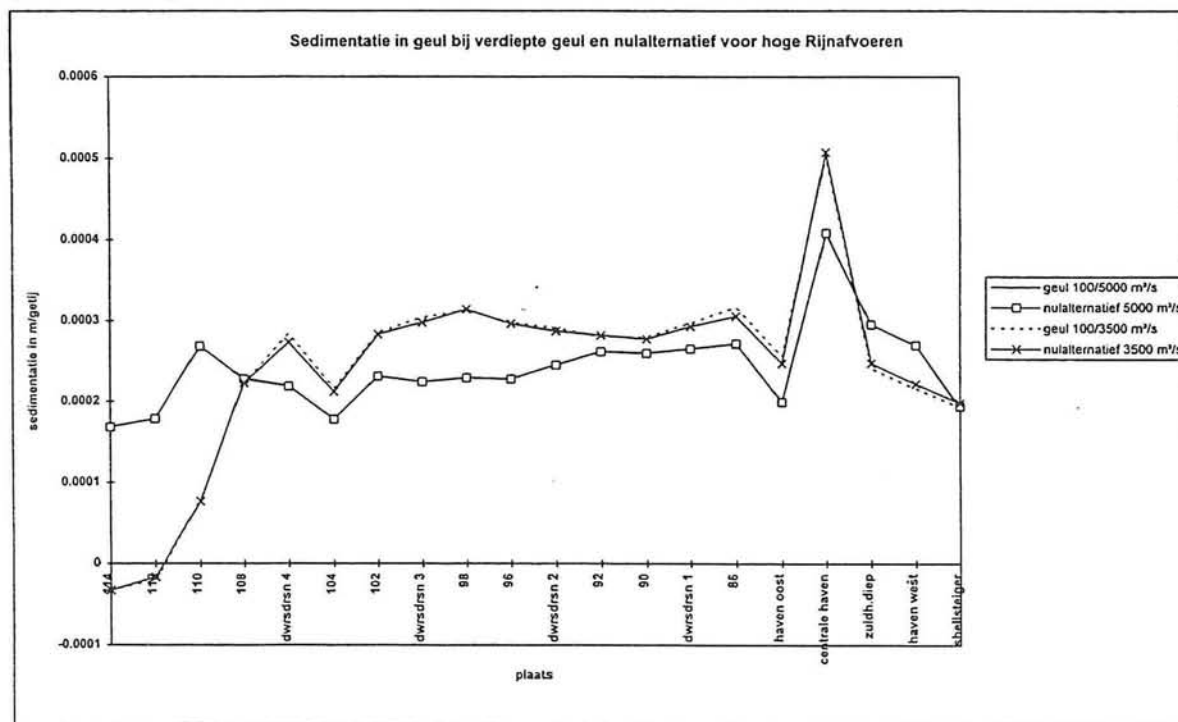
9.2.3 Sedimentbeweging en sedimentatie bij de verdiepte geul

Uit paragraaf 9.2.2 blijkt dat de waterbeweging bij een verdiepte geul nauwelijks verschilt van de huidige waterbeweging. Dit betekent dat ook de sedimentbeweging niet of nauwelijks zal veranderen. In figuur 9.3 zijn de veranderingen in de sedimentatie in de zeevaartgeul geschetst. De verdiepte geulen vangen iets meer sediment dan in de huidige situatie.



Figuur 9.3 Sedimentatie in de geul bij een verdiepte geul van 100 m. en 200 m. breed bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s

Het maximale verschil in de sedimentatie tussen de huidige situatie en de verdiepte geul is 0,013 mm per getij. In figuur 9.4 is de sedimentatie in de geul van 100 m. breed bij de hoge Rijnafvoeren geschetst.



Figuur 9.4 Sedimentatie in de geul bij hoge Rijnafvoeren voor een verdiepte geul van 100 m. breed en de huidige situatie

Er is geen verschil in sedimentatie bij een Rijnafoer van 5000 m³/s.

Omdat de modellering van de verdieping niet het verwachte resultaat opleverden, zijn dezelfde berekeningen gedaan met een geul van 200 meter breed en een bodemligging op NAP -14,0 m. Helaas was de som instabiel en hiervan zijn dus geen resultaten beschikbaar.

9.3 Conclusies

Het sedimentatiepatroon bij de HV2-min variant ziet er gunstig uit ten opzichte van de huidige situatie. Zoals verwacht sedimenteert er minder materiaal in het gebied en de sedimentatie is meer verspreid over het gebied. Op sommige plaatsen in de oversteek sedimenteert meer materiaal. Dit is slechts tijdelijk en op den duur zal de sedimentatie afnemen in de geul. Door de grotere getijdewerking wordt materiaal uit ondiepe gedeelten naar diepere gedeelten getransporteerd.

De resultaten van de berekeningen met de 100 m en 200 m. brede verdiepte geul vielen tegen. Er was nauwelijks verschil met de huidige situatie. Vooral bij hoge afvoeren was het verschil klein. Toch zijn deze resultaten wel bruikbaar, omdat hiermee kan worden aangetoond dat een verfijning van het grid ter plaatse van de oversteek effect zal hebben. Een verdieping en een verbreding leidden tot een kleine verandering. Uit deze resultaten is ook op te maken dat er meer moet veranderen dan alleen een verkleining van de roosterafstand. Wanneer over 200 meter meer dan een meter gemiddeld weggehaald wordt en de toename in sedimentatie is plaatselijk maar 5 %, dan zal een verfijning van het grid ook niet de verwachte resultaten opleveren.

10 Resultaten van de berekening van de alternatieven

De doelstelling bij het begin van het onderzoek was om van verschillende alternatieven de gevolgen te onderzoeken op de sedimentbeweging en de sedimentatie in het gebied. Aangezien het op orde krijgen van het model meer tijd heeft gekost dan gepland was, is weinig tijd overgebleven voor het testen van verschillende alternatieven.

Uiteindelijk zijn drie alternatieven getest:

- alternatief 1 : onderwaterdam
- alternatief 2 : gedeeltelijke afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep
- alternatief 3 : sedimentvang bovenstrooms van de Zeevaartgeul

In paragraaf 10.1 zal het eerste alternatief en de resultaten van de berekening ermee besproken worden. In paragraaf 10.2 wordt het tweede alternatief en in paragraaf 10.3 het derde alternatief behandeld.

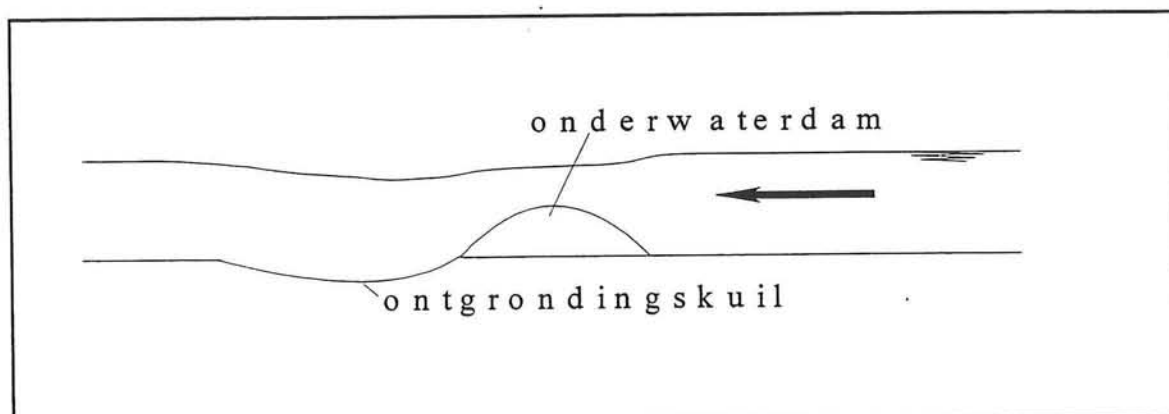
10.1 Resultaten bij alternatief 1 : Onderwaterdam

In deze paragraaf zal het eerste alternatief besproken worden. Dit is de onderwaterdam. In paragraaf 10.1.1 zal de manier van modellering aan de orde komen, in paragraaf 10.1.2 de optredende waterbeweging en in paragraaf 10.1.3 de sedimentatie bij het eerste alternatief.

10.1.1 Modellering van alternatief 1: Onderwaterdam

Een onderwaterdam is een verhoging van de bodemligging en is voor dit onderzoek evenwijdig aan de (toekomstige) zeevaartgeul, loodrecht op de stroomrichting van het water gemodelleerd. De onderwaterdam zorgt ervoor dat het water met een grotere stroomsnelheid over de top van de dam stroomt. Achter de dam vindt dan door de turbulentie en grotere stroomsnelheden erosie plaats. Hierdoor ontstaat er een ontgrondingskuil (zie figuur 10.1)

De onderwaterdam wordt meestal gemaakt van kleine stenen in de kern en grotere stenen



Figuur 10.1

aan het oppervlak. De functie die een onderwaterdam in het Hollandsch Diep kan spelen is

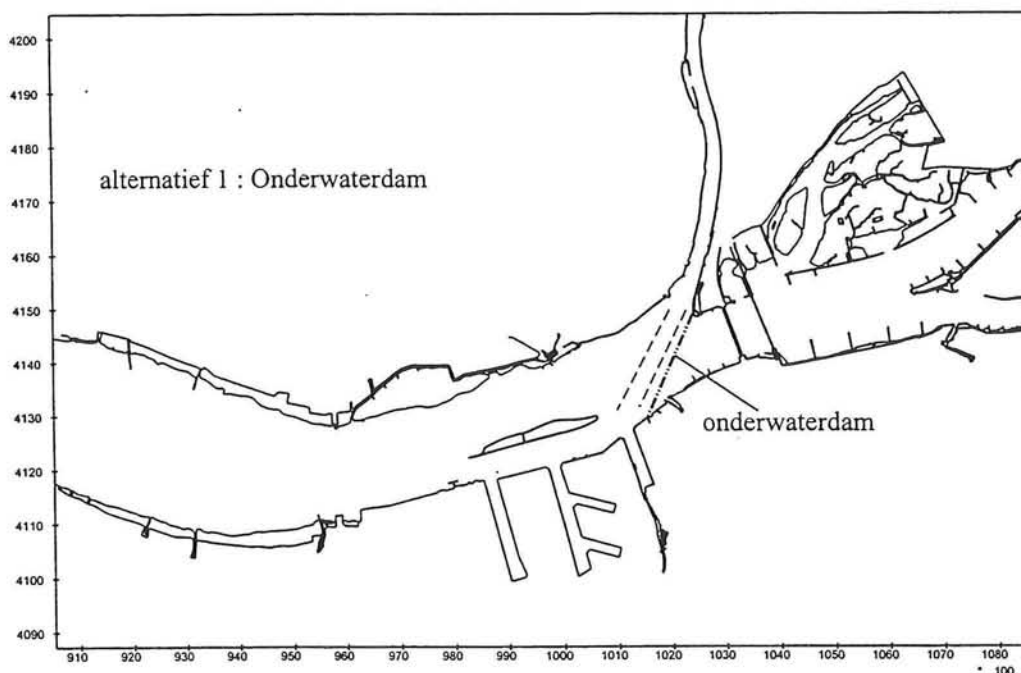
dat de zeevaart gebruik kan maken van de ontgrondingskuil die achter de onderwaterdam ontstaat. Hierdoor zal er minder gebaggerd hoeven te worden, omdat de stroming de geul op diepte houdt.

Een nadeel van dit alternatief is dat de onderwaterdam maar een beperkte hoogte kan hebben in de doorvaartgeul in langsrichting van het Hollandsch Diep. De dam mag niet belemmerend werken voor de scheepvaart in die richting bij laagwater. Een ander nadeel is dat de dam zelf niet door de ontgrondingskuil ondermijnd mag worden. Kans bestaat dan dat de dam in de kuil glijdt. Dit kan voorkomen worden door de bovenstroomse zijde van de ontgrondingskuil te bekleden met een beschermingslaag zodat de helling van de ontgrondingskuil klein blijft.

Dit alternatief is minder bruikbaar als de stroming, als gevolg van de getijdewerking, een kentering vertoont en de vloedstroom tegengesteld van richting is als de ebstroom. Dit is het geval bij lage Rijnafoer of wanneer het spuibeheer van de Haringvlietluizen verandert.

Tevens zal gekeken moeten worden naar de invloed op de waterstanden bovenstrooms (gevolgen voor bijvoorbeeld waterkeringen, waterinlaat/uitlaat) en de aanzanding bovenstrooms.

In onderstaande figuur 10.2 is de ligging van de onderwaterdam en het gebied te zien.



Figuur 10.2 Onderwaterdam in het gebied

De onderwaterdam is gemodelleerd als een verhoging van 100 meter breed die op NAP - 4,50 m. ligt. In het middendeel is voor de scheepvaart een uitsparing gemaakt van 400 meter breed en met een diepteligging op NAP -6,25 m.. De diepteligging op NAP -6,25 m. is gelijk aan de bodemligging van de Volkeraksluizen. Met deze modellering is voor Rijnafoeren van 2200 m³/s en 5000 m³/s de water- en sedimentbeweging berekend.

Naast deze modellering is ook nog met een variant gerekend. In deze modellering ligt de

onderwaterdam op NAP -2,5 m. en ligt de scheepvaartdoorgang op NAP -4,50 m.. Deze berekening was instabiel en de resultaten zullen hier dan ook niet behandeld worden.

10.1.2 Waterbeweging bij alternatief 1: Onderwaterdam

De onderwaterdam is een obstakel voor de waterbeweging in het gebied. Water dat over de dam wil stromen zal aan bovenstroomse zijde van de dam opgestuwd worden. De waterstand aan bovenstroomse zijde zal dus stijgen. Boven de dam zal het water harder gaan stromen en zal de waterstand dalen.

De invloed van de onderwaterdam zal waarschijnlijk niet in het hele gebied merkbaar zijn. In onderstaande tabel staan de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor de waterstand en de stroomsnelheid op diverse plaatsen in het gebied.

Rijnafvoer 2200 m ³ /s	Alternatief 1			Verskil met nulalternatief		
Waterstand in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	0.41	0.55	0.67	-0.001	0.000	0.000
H-Kop van het Land	0.48	0.63	0.76	0.000	0.000	0.002
H-Keizersveer	0.42	0.57	0.72	-0.001	0.000	-0.003
H-Dordtsche Kil	0.32	0.50	0.70	-0.002	0.000	0.004
H-Moerdijkbruggen	0.41	0.55	0.67	0.001	0.000	0.000
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Hollandsch Diep west	0.01	0.08	0.21	-0.001	0,0000	-0.002
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.01	0.08	0.22	-0.008	-0.022	-0.064
U-Oversteek	0.02	0.07	0.18	-0.005	-0.001	0.005
U-Onderwaterdam zuid	0.01	0.04	0.11	0.006	0.000	-0.001
U-Onderwaterdam midden	0.07	0.11	0.16	0.009	0.011	0.002
U-Onderwaterdam noord	0.06	0.30	0.47	0.035	0.097	0.147
U-Hollandsch Diep oost	0.02	0.19	0.30	0.001	-0.000	0.003
U-Amer	0.01	0.08	0.14	-0.002	-0.001	0.002
U-Nieuwe Merwede	0.11	0.22	0.27	0.002	0,0000	0.004
U-Dordtsche Kil	0.03	0.78	1.04	0.007	-0.001	-0.023

Tabel 10.1 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstanden en stroomsnelheden bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s voor de onderwaterdam (alternatief 1)

H=waterstanden in m boven NAP

U=snelheden in m/s

Zoals uit tabel 10.1 blijkt, heeft de onderwaterdam bijna geen invloed op de waterbeweging in het gebied. Dit geldt voor het hele gebied behalve voor de waarden van de stroomsnelheid boven de onderwaterdam. Daarvoor geven de waarden in tabel 10.1 een

verkeerd beeld. Uit de figuren in bijlage V.3.1 blijkt dat het verschil in de stroomsnelheden gedurende het getijde groter zijn. In het midden van het Hollandsch Diep, ter plaatse van de onderwaterdam is het verschil ongeveer 2 cm/s en aan de noordrand 15 cm/s. Op de overige plaatsen is er nauwelijks een verschil.

Met de modellering van alternatief 1 is ook een berekening gemaakt met een Rijnafoer van 5000 m³/s. Hierbij zullen de verschillen tussen het nulalternatief en alternatief 1 wat duidelijker zijn dan bij een gemiddelde Rijnafoer. Voor een hogere stroomsnelheid zal de onderwaterdam een groter obstakel zijn dan voor een gemiddelde Rijnafoer.

In onderstaande tabel 10.2 staan de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstanden op diverse plaatsen in het gebied. Ook zijn de stroomsnelheden ter plaatse van de onderwaterdam weergegeven.

Rijnafoer 5000 m ³ /s	Alternatief 1			Verskil met nulalternatief		
Waterstand in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	-0.02	0.30	0.66	-0.001	-0.001	-0.004
H-Kop van het Land	0.58	0.78	1.01	0.001	0.001	0.001
H-Keizersveer	0.23	0.52	0.81	0.001	0.001	0.000
H-Dordtsche Kil	-0.02	0.34	0.73	-0.003	-0.001	0.013
H-Moerdijkbruggen	-0.01	0.31	0.66	0.002	0.001	-0.004
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Onderwaterdam zuid	0,14	0,34	0,45	0,004	0,000	0,003
U-Onderwaterdam midden	0,16	0,39	0,57	0,019	0,018	0,013
U-Onderwaterdam noord	0,11	0,46	0,81	0,033	0,142	0,24

Tabel 10.2 Minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstanden bij een Rijnafoer van 5000 m³/s voor de onderwaterdam (alternatief 1)

H=waterstanden in m boven NAP

U=snelheden in m/s

In tabel 10.2 zijn geen andere stroomsnelheden opgenomen, omdat deze nauwelijks verschilden van de stroomsnelheden in de huidige situatie. In bijlage VII.3.1 zijn de stroomsnelheden op verschillende plaatsen gepresenteerd.

De enige plaats waar de stroomsnelheden wel verschilden was boven de onderwaterdam waar bij een Rijnafoer van 5000 m³/s een verschil van enkele millimeters in het midden van het Hollandsch diep werd gevonden en aan de noordkant een verschil van 23 cm/s.

10.1.3 Sedimentatie bij alternatief 1: Onderwaterdam

Zoals uit paragraaf 10.1.2 al blijkt is het stroombeeld bij alternatief 1 nauwelijks anders

dan bij de huidige situatie. De enige verschillen zijn de stroomsnelheden ter plaatse van de onderwaterdam. Verwacht mag worden dat deze hogere stroomsnelheden voor turbulentie achter de onderwaterdam zullen zorgen.

De verhoging in de stroomsnelheid is van 0,32 m/s tot 0,47 m/s bij een Rijnafoer van 2200 m³/s en bij een Rijnafoer van 5000 m³/s van 0,58 tot 0,81 m/s. Deze waarden gelden voor de noordkant van het Hollandsch Diep, bij de monding van de Dordtsche Kil.

In het midden van het Hollandsch Diep is de verandering van 0,14 m/s naar 0,16 m/s bij een Rijnafoer van 2200 m/s.

Om het verloop van de toename van de bodemdiepte te kunnen beschrijven is de volgende formule gebruikt (Breusers/Raudkivi, 1991):

$$h_{sm}(t) = \frac{(\beta \bar{u} - u_c)^{1,7} h_0^{0,2}}{10 \Delta^{0,7}} t^{0,4}$$

waarin:

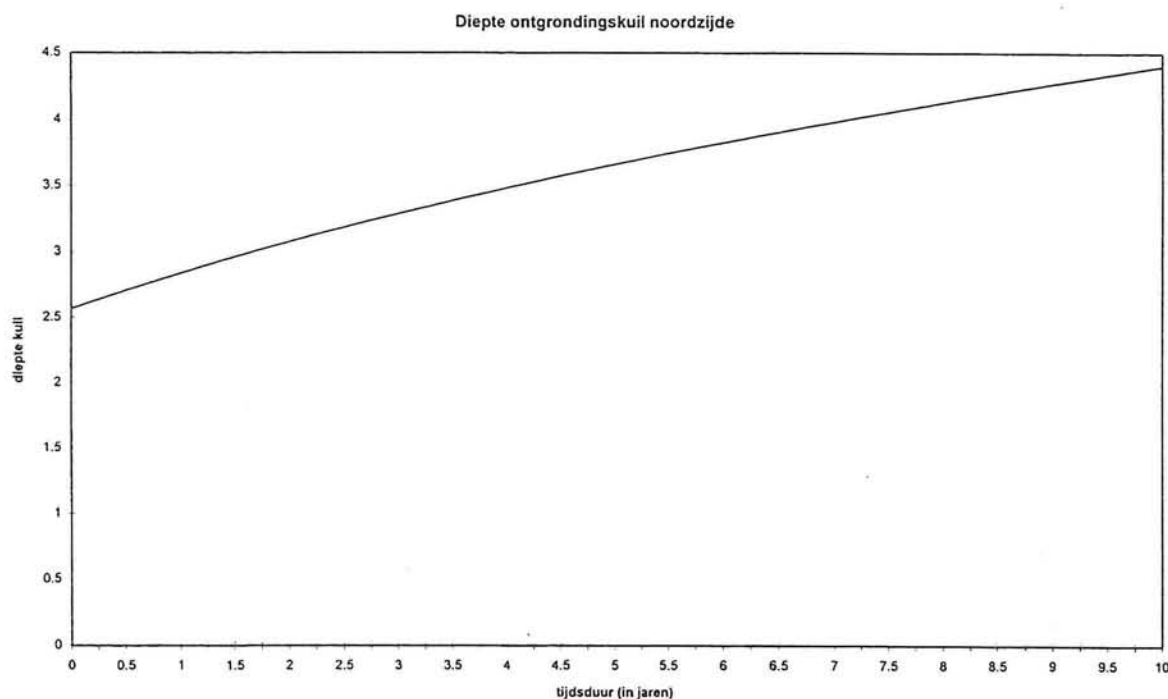
h_{sm}	: ontgrondingsdiepte	(m)
β	: constante	
$\bar{u}$	: lokale stroomsnelheid	(m/s)
u_c	: kritische stroomsnelheid	(m/s)
h_0	: waterdiepte	(m)
Δ	: relatieve dichtheid sediment(-)	
t	: tijdsduur	(uren)

De gebruikte waarden zijn: $\beta = 3$ (lokale stroomsnelheid), $u_c = 0,43$ m/s, $h_0 = 6$ m, $\Delta = 1,65$.

Onder invloed van de getijdebeweging wisselt de $\bar{u}$ voortdurend. In de bovenstaande formule moet daarom de volgende vereenvoudiging worden toegepast:

$$(\beta \bar{u} - u_c)^{1,7} = \frac{1}{T} \int (\beta \bar{u} - u_c)^{1,7} dt$$

Dit leverde voor een Rijnafvoer van 2200 m³/s het volgende verloop van de erosie van de ontgrondingskuil aan de noordkant van de Zeevaartgeul (figuur 10.3).



Figuur 10.3 Verloop erosie van ontgrondingskuil in het noordelijk deel van de Zeevaartgeul

De figuur begint bij een ontgroning van 2,5 meter, omdat dit de huidige diepte van de zeevaartgeul is (NAP-8,50 m.).

In de monding van de Dordtsche Kil zal de bodemligging van de Zeevaartgeul dus in 10 jaar toenemen tot NAP-10,50 m. Uiteindelijk wordt er een evenwichtsdiepte bereikt.

In de andere twee punten treedt bij een gemiddelde Rijnafvoer geen verandering op. De term $(\beta \bar{u} - u_c)^{1.7}$ is op deze plaatsen te klein.

Voor een Rijnafvoer van 5000 m³/s is geen berekening uitgevoerd, omdat deze afvoer te weinig voorkomt om tot een betrouwbaar resultaat te komen.

Zoals te zien is zal dit een kleine verbetering zijn van de huidige situatie. Een nadeel is dat de grootste ontgrondingskuil optreedt bij de monding van de Dordtsche Kil terwijl hier de minste problemen zijn. Het is daarom niet verstandig om een onderwaterdam aan te leggen, omdat deze onvoldoende resultaat oplevert en op de verkeerde plaats voor een ontgrondingskuil zorgt.

10.2 Resultaten bij alternatief 2 : Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep

Het Haringvliet en het Hollandsch Diep waren voor de afsluiting van het Haringvliet dieper. De stroomsnelheden waren toen gemiddeld 75-85 cm/s. Na afsluiting werden de stroomsnelheden 20 cm/s. Omdat sediment nog steeds aangevoerd en nauwelijks afgevoerd werd na de afsluiting van het Haringvliet vond er sedimentatie in het hele gebied plaats.

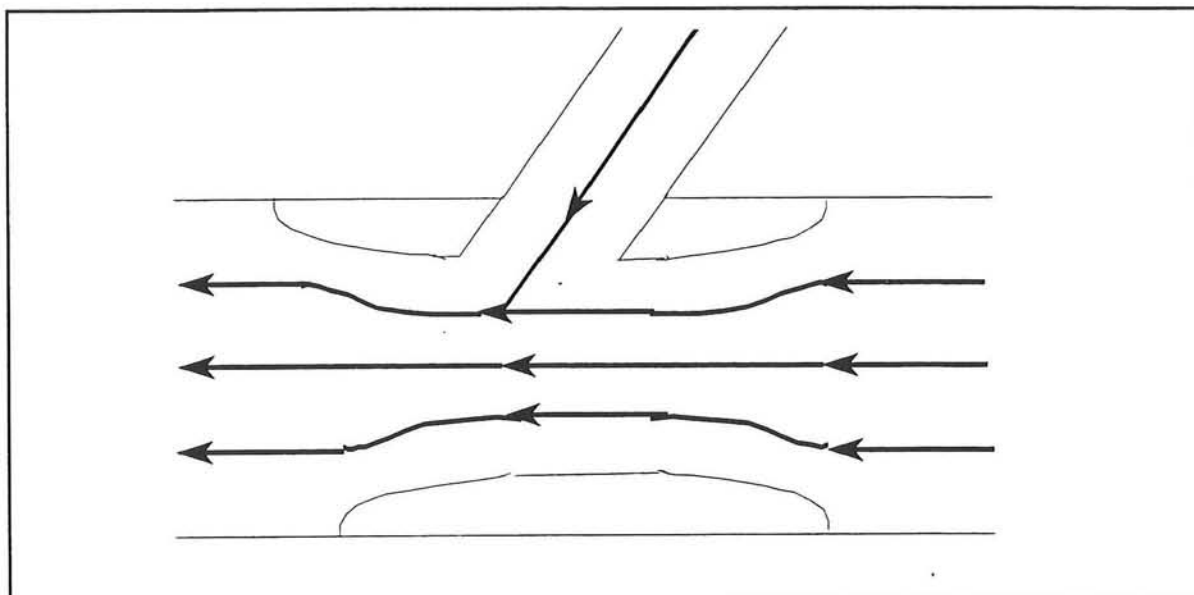
Dit proces van sedimentatie zal er op den duur ervoor zorgen, dat er een nieuw evenwichtsprofiel ontstaat. De stroomsnelheden zullen dan hoger zijn dan in de huidige situatie en er zal netto geen of nauwelijks sedimentatie of erosie plaatsvinden.

Hoewel deze ontwikkeling in eerste instantie positief klinkt is het vanuit het oogpunt van de gebruiksfuncties van het Hollandsch Diep en Haringvliet geen goede ontwikkeling. Er zal waarschijnlijk een stelsel van ondiepe geulen ontstaan. De vraag is of dan nog wel aan de benodigde diepte voor de scheepvaart voldaan kan worden en wat het gedrag bij extreem hoge afvoeren zal zijn (overstromingsgevaar).

Toch is het principe van profielvermindering bruikbaar indien dit niet aan de natuur overgelaten wordt. Omdat de waterdiepte maatgevend is vanuit nautische overwegingen, moet de oplossing worden gezocht in breedtevermindering van het doorstroomprofiel.

Ter plaatse van de zeevaartgeul naar Moerdijk ligt de bodem nu op NAP -8,50 m.. In de toekomst zal deze bodemligging verschuiven naar NAP -9,30 m. (zie paragraaf 2.5). De ideale situatie zal ontstaan als door technische ingrepen de rivier zichzelf op deze diepte houdt. Dit kan door ter plaatse van de zeevaartgeul zowel aan bovenstroomse als aan benedenstroomse kant het Hollandsch Diep te vernauwen (zie figuur 10.4)

Omdat de watersnelheden zullen toenemen kunnen problemen ontstaan met de scheepvaart.



Figuur 10.4 Waterstroming bij vernauwing

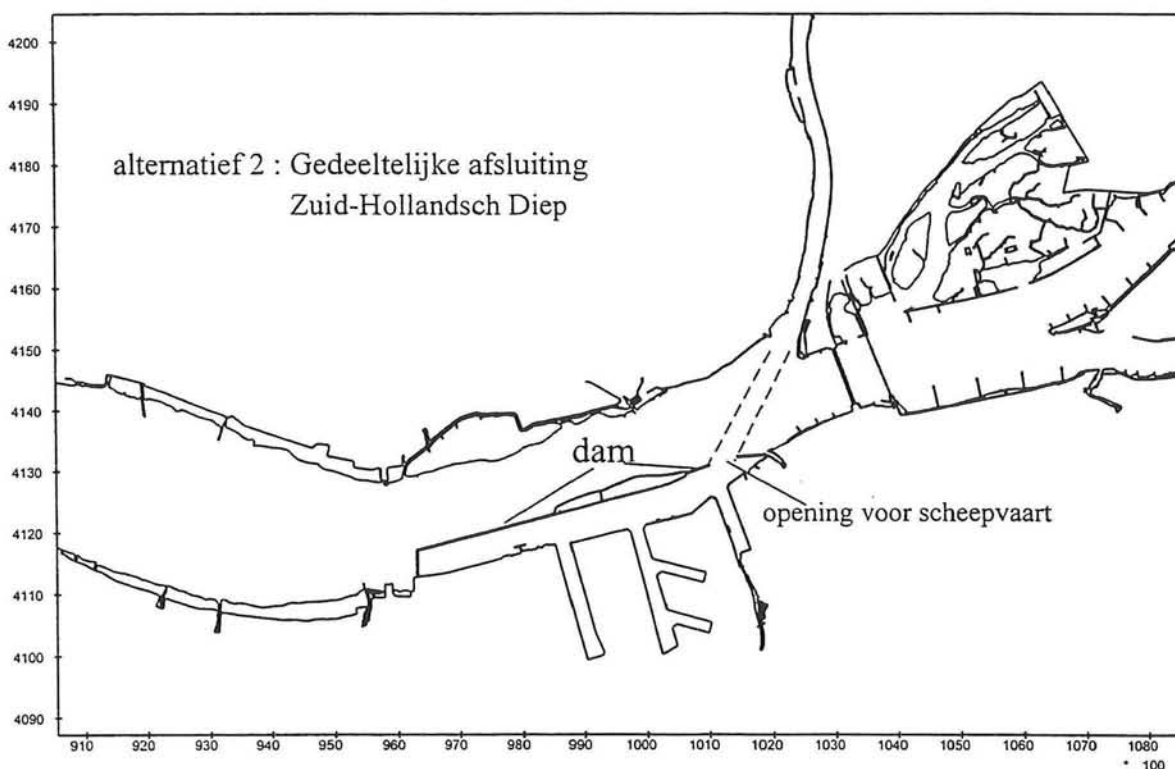
In het verloop van het onderzoek (Tweede Tussenrapport, Jansen, 1995) zijn een aantal alternatieven voorgesteld om de geulversmalling tot stand te brengen.

Deze alternatieven hielden een afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep in, waardoor de doorgaande stroom door het deel van het Hollandsch Diep dat ten noorden van de Sassenplaat ligt, moest stromen. Eventueel in combinatie met een aantal kribben aan de noordoever van het Hollandsch Diep, zouden deze alternatieven voor grotere stroomsnelheden en dus minder sedimentatie moeten zorgen. Een nadeel van deze alternatieven is dat door de afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep, dit gedeelte de functie zou kunnen krijgen van sedimentvang.

Na evaluatie van deze alternatieven is een nieuw alternatief ontwikkeld dat zowel voor scheepvaart als voor sedimentstroming een goede oplossing zou kunnen zijn.

10.2.1 Modellerings van alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep

Het alternatief houdt een gedeeltelijke afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep in (figuur 10.5). De afsluiting bestaat uit twee delen: een vernauwing van de monding van het Zuid-Hollandsch Diep en een afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep aan westelijke zijde van de Sassenplaat. Hierdoor ontstaat een groot havenbekken waaraan de drie huidige havenbekkens liggen.



Figuur 10.5 Alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep

Door deze gedeeltelijke afsluiting vindt er in het Zuid-Hollandsch Diep geen doorvoer van water meer plaats. De indringing van sediment wordt tegengegaan door de doorvaartopening in de mond van het nieuwe havenbekken zo klein mogelijk te maken. In eerder onderzoeken (E. Langendoen, 1992) bleek dit zeer voordelig te werken. Eventueel

kan hier ook een flexibel of vast sedimentscherm geplaatst worden dat het bodemtransport tegen kan gaan. Een mogelijkheid om de aanslibbing verder te reduceren is het gebruik van een 'current deflecting wall'. Onderzoek hiernaar is gedaan door J.C. Winterwerp van het Waterloopkundig Laboratorium.

Dit alternatief heeft grote wijzigingen tot gevolg. Zo wordt de aanwezigheid van koelwater voor de aanwezige industrie beperkt door de gedeeltelijke afsluiting van het IHM. De modellering die momenteel gehanteerd wordt, gaat al uit van een afgesloten bekken. Dit is een veilige benadering en zal toch aangepast moeten worden om bij de gedeeltelijke afsluiting nog veilig te zijn.

Ook de meeste vluchtwegen voor de scheepvaart zullen door de gedeeltelijke afsluiting verdwijnen. Een oplossing hiervoor is om het bekken groot genoeg te maken zodat bij eventuele calamiteiten voldoende ruimte is om weg te kunnen varen.

De werken kunnen uitgevoerd worden als zandlichamen. Een voordeel is dat de Sassenplaat en het ondiepe gedeelte westelijk van de Sassenplaat ervoor zorgen dat de hoeveelheid te gebruiken grond laag blijft. Eventueel kan dit nog gecombineerd worden met de nieuw aan te leggen stortlocatie in het Hollandsch Diep, waarbij veel grond vrijkomt.

In de modellering van dit alternatief is de opening in de toegang tot het Zuid-Hollandsch Diep ongeveer 400 meter.

10.2.2 Waterbeweging bij alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep

De gedeeltelijke afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep heeft tot gevolg dat er geen water meer via het Zuid-Hollandsch Diep afgevoerd kan worden. Dit water wordt dan door het overige deel van het Hollandsch Diep afgevoerd. Vooral in het gedeelte van het Hollandsch Diep tussen Klundert en de Moerdijkbruggen zullen de stroomsnelheden omhoog gaan. In bijlage V.4.1 is het stroombeeld gedurende het getij getekend.

In tabel 10.3 zijn de minimale, gemiddelde en maximale waarden van de waterstanden en de stroomsnelheden die optreden bij alternatief 2 vermeld.

Rijnafvoer 2200 m ³ /s	Alternatief 2			Verskil met nulalternatief		
Waterstand in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	0.40	0.55	0.67	-0.014	0.000	-0.002
H-Kop van het Land	0.46	0.63	0.78	-0.014	0.001	0.010
H-Keizersveer	0.40	0.58	0.70	-0.019	0.001	-0.021
H-Dordtsche Kil	0.31	0.51	0.72	-0.003	0.001	0.018
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Hollandsch Diep west	0.03	0.11	0.25	0.018	0.027	0.041
U-Hollandsch Diep midden	0.00	0.14	0.35	-0.055	0.014	0.095
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.00	0.02	0.06	-0.001	-0.041	-0.092
U-Oversteek 1	0.00	0.03	0.13	-0.008	-0.025	-0.025
U-Oversteek 3	0.01	0.08	0.18	-0.012	0.011	-0.008
U-Onderwaterdam	0.05	0.11	0.17	-0.008	0.007	0.004

Tabel 10.3 Minimale, gemiddelde en maximale waterstanden en stroomsnelheden voor alternatief 2 bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s en verschil met waarden van nulalternatief

H: waterstand in m boven NAP

U: stroomsnelheid in m/s

In bijlage V.4.2 is het verloop van waterstand en stroomsnelheid gedurende het getijde in sommige punten te zien.

De stroomsnelheden op de Dordtsche Kil, het oostelijk deel van het Hollandsch Diep, de Nieuwe Merwede en de Amer zijn niet veranderd ten opzichte van het nulalternatief.

De stroomsnelheid in de punten Oversteek 1 (aan binnenzijde van de dam) en in het Zuid-Hollandsch Diep zijn flink omlaag gegaan. In het punt Hollandsch Diep midden (boven Sassenplaat) en Oversteek-3 (midden op Hollandsch Diep) zijn de stroomsnelheden gestegen.

Ook is een berekening uitgevoerd met een Rijnafvoer van 5000 m³/s. Voor een hoge afvoer geldt hetzelfde als voor een gemiddelde afvoer bij dit alternatief. Door het doorstroomprofiel te vernauwen zal het water ter plaatse van de oversteek sneller gaan stromen. In bijlage VII.4.1 is het stroombeeld gedurende het getijde getekend voor alternatief 2 met een Rijnafvoer van 5000 m³/s.

In tabel 10.4 volgen enkele minimale, gemiddelde en maximale waarden voor punten in het gebied bij een Rijnaafvoer van 5000 m³/s in combinatie met alternatief 2.

Rijnaafvoer 5000 m ³ /s	Alternatief 2			Verskil met nulalternatief		
Waterstand in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	-0.01	0.32	0.67	0.009	0.017	0.005
H-Kop van het Land	0.58	0.80	1.02	0.004	0.013	0.008
H-Keizersveer	0.23	0.54	0.81	0.005	0.018	0.008
H-Dordtsche Kil	0.01	0.36	0.72	0.020	0.016	0.008
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Hollandsch Diep w.	0.19	0.42	0.52	0.055	0.061	0.058
U-Hollandsch Diep m.	0.19	0.52	0.66	0.072	0.129	0.088
U-Zuid-Hollandsch D.	0,00	0.02	0.07	-0.113	-0.266	-0.314
U-Oversteek 1	0.00	0.07	0.20	-0.125	-0.217	-0.176
U-Oversteek 3	0.22	0.45	0.62	0.063	0.079	0.082
U-Onderwaterdam	0.20	0.43	0.62	0.056	0.054	0.060

Tabel 10.4 Minimale, gemiddelde en maximale waterstanden en stroomsnelheden voor alternatief 2 bij een Rijnaafvoer van 5000 m³/s en verschil met de waarden van het nulalternatief

H: waterstand in m boven NAP

U: stroomsnelheid in m/s

Ook bij een hoge afvoer gaan de stroomsnelheden in het Zuid-Hollandsch Diep omlaag ten opzichte van de huidige situatie. In de oversteek en op het Hollandsch Diep ten noorden van de Sassenplaat stijgen de stroomsnelheden ten opzichte van de huidige situatie.

In het hele gebied stijgt de waterstand bij toepassing van alternatief 2 met een Rijnaafvoer van 5000 m³/s. In bijlage VII.4.2 zijn voor enkele plaatsen de waterstanden en stroomsnelheden getekend.

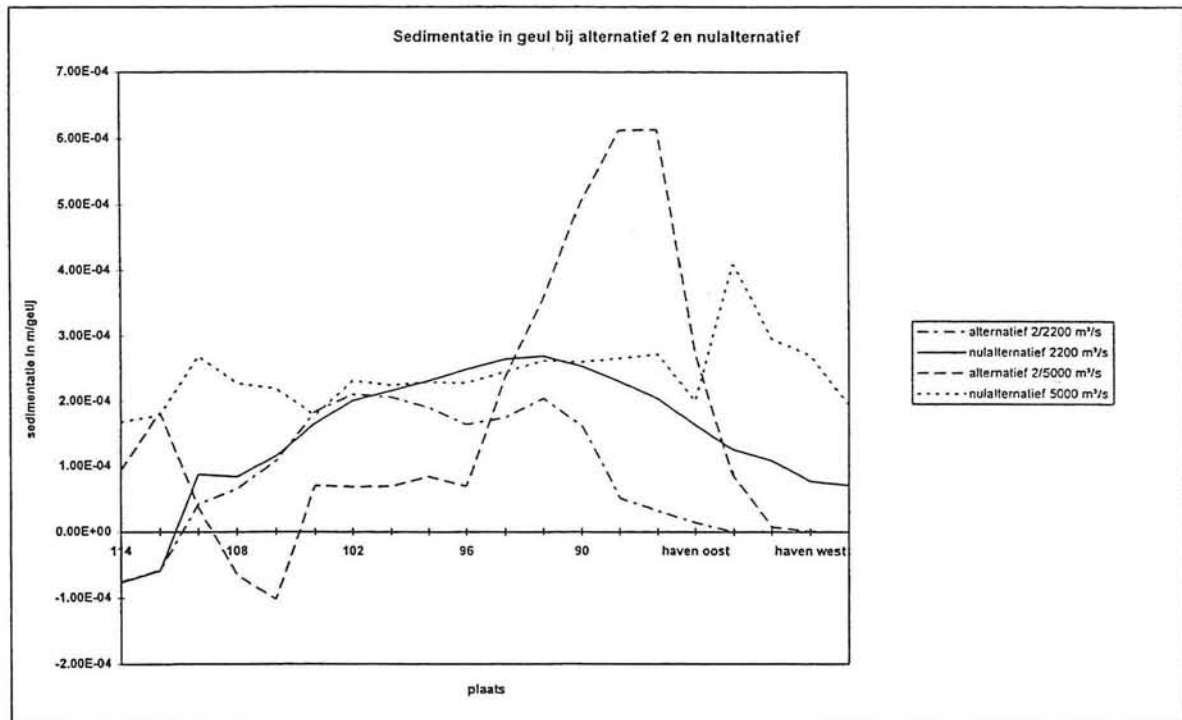
10.2.3 Sedimentatie bij alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep

Grotere stroomsnelheden zullen ook leiden tot een lagere sedimentatie in het gebied. Waarschijnlijk zal in de monding van het nieuwe havenbekken de sedimentatie wel toenemen ten gevolge van de uitwisseling van water en sediment met de langsgaande stroom door neerstrooming.

In de bijlage V.4.3 en VII.4.3 zijn voor een Rijnaafvoer van 2200 m³/s en een Rijnaafvoer van 5000 m³/s de sedimentatie in het gebied gepresenteerd voor alternatief 2. Het sediment

wordt niet meer ter plaatse van de geul afgezet maar stroomt westwaarts en wordt daar afgezet. Bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s vindt die afzetting plaats ter hoogte van de Sassenplaat en bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s gebeurt dit in het westelijk deel van het Hollandsch Diep. Bij een dergelijke hoge afvoer vindt zelfs erosie plaats op het Hollandsch Diep ter hoogte van de Sassenplaat.

In figuur 10.6 is de sedimentatie in de geul geschetst.



Figuur 10.6 Sedimentatie in de geul bij alternatief 2.

Zoals verwacht sedimenteert wel een groot gedeelte in de monding van het nieuwe havenbekken. Bij een gemiddelde Rijnafvoer is dit minder dan in de oude situatie, bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s is dit meer. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt doordat de concentraties vanuit de Amer bij een hoge afvoer veel groter zijn en dat deze hoge concentraties in het water dat langs de opening stroomt door middel van uitwisseling voor een grote sedimentatie zorgen in het gedeelte net achter de opening.

Deze hoeveelheid is vergeleken bij de sedimentatie die voorheen in het Zuid-Hollandsch Diep optrad, toch vrij klein, omdat in het overige gedeelte van het Zuid-Hollandsch Diep vrijwel geen sedimentatie voorkomt bij alternatief 2.

10.3 Resultaten alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul

Bij de vorige alternatieven is geprobeerd om de sedimentatie in de geul te verminderen door de turbulentie of de stroomsnelheid ter plaatse van de geul te verhogen. Een andere oplossing is door vooraf het sediment uit het water te halen. Dit kan door een sedimentvang bovenstrooms van de geul aan te leggen of door een slibscherm in de havenmond te maken. In deze paragraaf komt de sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul aan de orde.

De werking van de sedimentvang is vrij eenvoudig. Door de stroomsnelheid kunstmatig te verlagen door bijvoorbeeld plaatselijk het doorstroomprofiel te vergroten zal een gedeelte van het sediment bezinken. Bovendien kan ook het bodemtransport onderbroken worden. Hierdoor wordt een groot gedeelte van het meegevoerde sediment verzameld in de sedimentvang. In een tweede geul bovenstrooms van de zeevaartgeul moet immers evenveel sediment terecht kunnen komen als in de zeevaartgeul nu.

Een voordeel van een sedimentvang is dat deze minder vaak gebaggerd hoeft te worden dan de zeevaartgeul momenteel. Het sediment ligt dan langer op de bodem en kan daardoor consolideren. Bij het baggeren is de bovenlaag van de bodem een stuk compacter, zodat een stuk minder diep gebaggerd hoeft te worden. De kwaliteit van de gebaggerde specie zal hoger zijn en het gebaggerde sediment kan dus goedkoper gestort of verwerkt worden.

10.3.1 Modellerings van alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul

Zowel de Dordtsche Kil als de Nieuwe Merwede en de Amer voeren sediment aan. Toch denk ik dat één sedimentvang in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep voldoende is. Deze sedimentvang zal dan alleen het aangevoerde sediment uit de Nieuwe Merwede en de Amer afvangen.

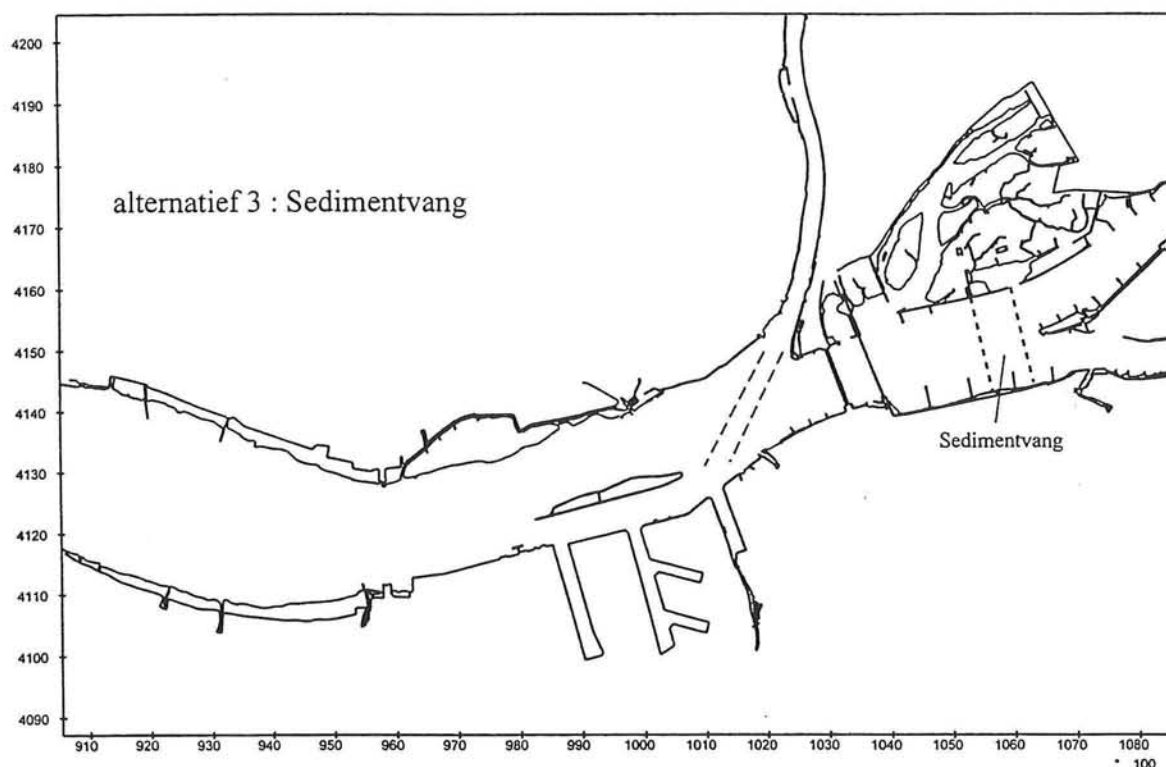
Een klein deel van het sediment dat de Dordtsche Kil aanvoert is afkomstig van buiten het gebied. Een groot deel is tijdens een eerder stadium van het getij via de Dordtsche Kil het gebied uitgevoerd.

Het sediment dat door de Nieuwe Merwede en de Amer wordt aangevoerd is voor het grootste gedeelte sediment dat van buiten het gebied is aangevoerd.

Op de Dordtsche Kil staan hoge stroomsnelheden, zodat een sedimentvang hier veel minder efficiënt is dan een sedimentvang in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep. De stroomsnelheden in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep zijn veel lager dan op de Dordtsche Kil.

De beste plaats om in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep een sedimentvang aan te leggen is bij de monding van de Nieuwe Merwede en de Amer. Een sedimentvang net naast de zeevaartgeul is niet verstandig. In dit gedeelte staan de pijlers van de Moerdijkbruggen zodat er weinig plaats overblijft voor de sedimentvang. De pijlers zorgen bovendien voor veel turbulentie, waardoor weinig sediment kan bezinken. Ook is dit een smal gedeelte van het Hollandsch Diep en zullen de stroomsnelheden daardoor hoger zijn.

Bij de monding van de Nieuwe Merwede en de Amer is het Hollandsch Diep breder en kan eenvoudig breder gemaakt worden door een aantal kribben te verwijderen.
Mijn modellering is daarom zoals in figuur 10.7 te zien is, in het model ingebracht.



Figuur 10.7 Modellering alternatief 3: sedimentvang bovenstrooms van de Zeevaartgeul

Om de effecten goed te bekijken is de sedimentvang 1 kilometer breder gemaakt en ligt de bodem op NAP-12 m.. De huidige bodemligging is hier NAP - 6 m..

10.3.2 Waterbeweging bij alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van de Zeevaartgeul

Met dit alternatief zijn berekeningen uitgevoerd met een Rijnafoer van 2200 m³/s en 5000 m³/s. De stroomsnelheid moet ter plaatse van de sedimentvang omlaag gaan. In onderstaande tabel zijn de minimale, gemiddelde en maximale waarden voor waterstanden en stroomsnelheden in het gebied aangegeven.

Rijnafoer 2200 m ³ /s	Alternatief 3			Verskil met Nulalternatief		
Waterstand in m.+NAP	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
H-Moerdijk	0.41	0.55	0.67	-0.001	-0.000	-0.004
H-Kop van het Land	0.48	0.63	0.76	-0.001	-0.001	-0.001
H-Keizersveer	0.42	0.57	0.72	0.002	-0.001	0.002
H-Dordtsche Kil	0.32	0.50	0.71	0.000	0.000	0.007
Stroomsnelheden in m/s	min.	gem.	max.	min.	gem.	max.
U-Hollandsch Diep west	0.01	0.08	0.21	-0.001	0.000	0.003
U-Zuid-Hollandsch Diep	0.00	0.06	0.15	0.002	0.001	0.002
U-Oversteek	0.02	0.07	0.19	0.001	0.001	-0.003
U-Hollandsch Diep oost	0.02	0.19	0.28	-0.004	-0.006	-0.021
U-Amer	0.01	0.08	0.14	0.002	0.000	0.000
U-Nieuwe Merwede	0.12	0.23	0.27	0.008	0.008	0.003
U-Dordtsche Kil	0.04	0.78	1.05	-0.003	-0.000	0.025

Tabel 10.7 Minimale, gemiddelde en maximale waarden van de waterstanden en stroomsnelheden voor alternatief 3 bij een Rijnafoer van 2200 m³/s en het verschil met de huidige situatie

H: waterstand in m boven NAP

U: stroomsnelheid in m./s

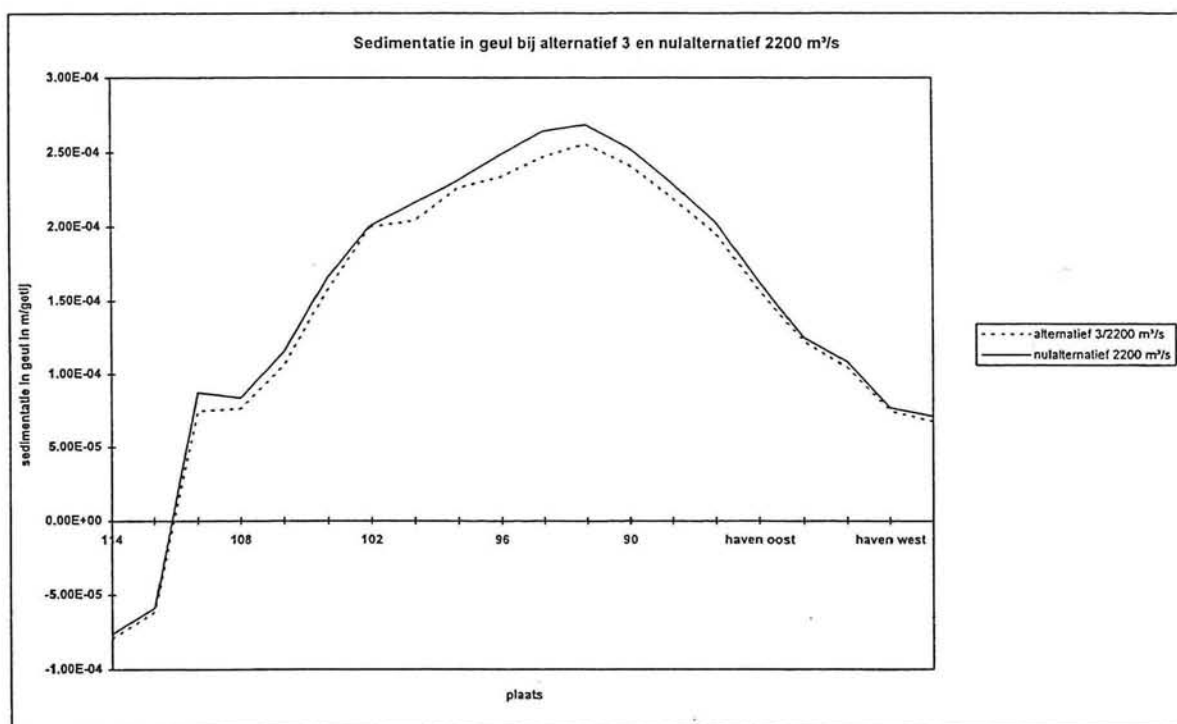
De stroomsnelheden in het oostelijke deel van het Hollandsch Diep nemen af. Helaas was er geen meetpunt voor de waterstand in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep. De waterstanden en stroomsnelheden elders in het gebied veranderen nauwelijks. In bijlage V.5.1 is het verloop van de waterstand en de stroomsnelheid van een aantal punten in het gebied getekend.

Voor een Rijnafoer van 5000 m³/s is ook een berekening met alternatief 3 gemaakt maar deze berekening was instabiel.

10.3.3 Sedimentbeweging bij alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van de Zeevaartgeul

Voor de sedimentbeweging en sedimentatie in het gebied zijn alleen resultaten uit de berekening van de gemiddelde afvoer gekomen. De berekening van de sedimentbeweging bij een Rijnafvoer van 5000 m³/s was instabiel.

In bijlage V.5.2 is de totale sedimentatie per getij gepresenteerd. Duidelijk is de grote toename van sediment ter plaatse van de sedimentvang zichtbaar. De sedimentvang werkt op die plaats dus goed. Er zal minder sediment doorstromen richting zeevaartgeul. In onderstaande figuur is de sedimentatie in de zeevaartgeul te zien.



Figuur 10.8 Sedimentatie per getij in de geul voor alternatief 3

In figuur 10.8 is voor de sedimentatie in de geul nauwelijks verschil te zien met de sedimentatie in de huidige situatie. Dit komt doordat de randvoorwaarden van de concentratie op de Dordtsche Kil niet veranderd zijn. Daardoor stroomt er minder sediment uit, maar wel evenveel sediment in. Dit bevestigt mijn vermoeden, dat de sedimentatie bij een gemiddelde Rijnafvoer mede bepaald wordt door de randvoorwaarde op de Dordtsche Kil. Een betere modellering zou een modellering zijn waarbij de Dordtsche Kil langer zou zijn, zodat het sediment het model niet uitstroomt. Er was geen tijd meer om de randvoorwaarde op de Dordtsche Kil aan te passen. Bij nieuwe berekeningen zou voor dit alternatief bijvoorbeeld gemiddelde uitstromende concentratie genomen kunnen worden. Verbeek (1995) heeft als randvoorwaarden op de Dordtsche Kil voor de tweedimensionale horizontale berekening concentraties opgelegd die met een ééndimensionale modellering berekend zijn.

10.4 Andere alternatieven

Met de ingrepen die in de paragrafen 10.1 tm 10.3 genoemd zijn, zijn berekeningen gedaan. Daarnaast zijn er nog een aantal alternatieven die zijn afgefallen:

-Aan de noordzijde van het Hollandsch Diep ter hoogte van de Sassenplaat kribben aanbrengen. Hierdoor wordt het doorstroomprofiel verkleind en zal door grotere stroomsnelheden minder sedimentatie optreden. Een nadeel hiervan is dat juist in dit gedeelte van het Hollandsch Diep veel sedimentatie optreedt en het sedimenttransport door het Zuid-Hollandsch Diep groter wordt. Daardoor zal er relatief weinig sediment afgezet worden maar ligt dit door de grotere concentratie in de suspensie toch dicht bij de huidige optredende sedimentatie.

-Door permanent te jetten in de geul het sediment in suspensie houden of brengen. Dit alternatief valt af vanwege de kosten en de risicogevoeligheid.

-Permanent baggeren in de geul met behulp van een vaste permanente zuiger. Dit alternatief valt af omdat het slib dan toch geborgen moet worden en vanwege de te hoge kosten.

10.5 Evaluatie en conclusies van de alternatieven

In hoofdstukken 10 zijn de resultaten besproken van de alternatieven die tijdens het onderzoek bekeken zijn. Dit waren de volgende alternatieven:

- alternatief 1 : onderwaterdam
- alternatief 2 : gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep
- alternatief 3 : sedimentvang bovenstrooms van zeevaartgeul

Het eerste alternatief, de onderwaterdam gaf een redelijk resultaat. Het water dat over de onderwaterdam stroomt heeft bij alternatief 1 een hogere stroomsnelheid dan in de huidige situatie. Door deze versnelling en de turbulentie achter de dam zal achter de dam een ontgrondingskuil ontstaan. In WAQUA is moeilijk de turbulentie te modelleren. Voor een juiste evaluatie is het nodig de berekeningen nogmaals uit te voeren met een 3D-model waarin de turbulentie ook berekend kan worden. In dit onderzoek is alleen de Chezy-coëfficiënt ter plaatse van de onderwaterdam veranderd.

Een probleem van de onderwaterdam is dat de versnelling van het water vooral aan de noordelijk kant van de onderwaterdam optreedt. Hierdoor vindt de grootste ontgroning plaats in het gedeelte waar weinig sedimentatie optreedt en blijft op de plaatsen waar wel veel sedimentatie optreedt het effect gering. Op de waterbeweging heeft dit alternatief nauwelijks invloed en zijn alleen plaatselijk van de onderwaterdam hogere stroomsnelheden te vinden.

Het tweede alternatief: de gedeeltelijke afsluiting van het Zuid-Hollandsch Diep, geeft meer resultaat. Doordat het doorstroomprofiel ter plaatse van de oversteek vernauwd wordt, gaan de stroomsnelheden omhoog. Daardoor sedimenteert veel minder materiaal in de oversteek en ten noorden van de Sassenplaat. Gemiddeld sedimenteert ongeveer 0,17 mm/getij bij een gemiddelde Rijnafoer en alternatief 2 tegen 0,24 mm/getij in de huidige situatie. Dit is per jaar 0,12 m bij alternatief 2 tegen 0,17 m normaal. Dit is een afname van 30%.

Bij een hoge Rijnafoer treedt plaatselijk zelfs erosie op. Hier is de afname van 0,24 mm/getij in de huidige situatie tot 0,13 mm/getij met alternatief 2. Dit is per jaar een afname van 0,17 m naar 0,09 m, bijna een halvering.

In de monding van het Zuid-Hollandsch Diep vindt vooral bij hoge afvoeren een grote sedimentatie plaats. Dit komt door de uitwisseling van sediment met de langsgaande stroom. Bij een Rijnafoer van 5000 m³/s is deze sedimentatie ongeveer 2 keer de sedimentatie voor het nulalternatief. Bij een gemiddelde Rijnafoer is de sedimentatie voor alternatief 2 in de havenmond lager dan voor het nulalternatief.

In het overige gedeelte van het Zuid-Hollandsch Diep vindt nauwelijks sedimentatie plaats.

Bij alternatief 3, de sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul, is het verschil met de huidige situatie klein. In de oversteek sedimenteert gemiddeld 4% minder sediment dan in de huidige situatie. Normaal is de sedimentatie 0,24 mm/getij en bij alternatief 3 is de sedimentatie 0,23 mm/getij. Waarschijnlijk komt dit doordat de aanvoer van sediment door de Dordtsche Kil hetzelfde is gebleven in de modellering.

11 Conclusies en evaluatie

De modellen die tijdens dit onderzoek gebruikt zijn geven als resultaat nog geen goed beeld van de werkelijkheid in een relatief klein gebied. De waterbewegingsmodellen zijn redelijk betrouwbaar en behoeven weinig aanpassingen. In de toekomst is het verstandig om met grotere tweedimensionale horizontale modellen te gaan werken of zelfs met driedimensionale modellen. Dan kan de invloed van de ééndimensionale modellering teruggedrongen worden.

In ieder geval is het wel verstandig de programma's wat gebruikersvriendelijker te maken, zodat het doorgronden van de programma's eenvoudiger wordt.

De resultaten van de berekende waterbeweging kloppen redelijk met de werkelijk optredende waterbeweging. Een probleem is dat tijdens het onderzoek gewerkt is met een vereenvoudigde waterbeweging (slotgemiddelde getijden) en dat in werkelijkheid de waterbeweging veel meer varieert. Deze vereenvoudigde waterbeweging is gebruikt omdat de resultaten van één enkel getij dan een aantal keer achter elkaar gezet kunnen worden en het begin aan het einde kan aansluiten. Aan het begin van het onderzoek was namelijk niet duidelijk welke inspeelperiodes nodig waren en in voorgaande onderzoeken is ook gewerkt met een vereenvoudigde waterbeweging. De programma's ZWENDL en WAQUA zijn echter al vaak genoeg met een echt optredende waterbeweging getoetst om betrouwbaar te zijn.

De grootste aanvoer van water en sediment komt van de Nieuwe Merwede en de Amer.

Bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s is de invloed van de Dordtsche Kil op de stroming ter plaatse van de oversteek groter dan bij hogere afvoeren. Analyse van de lodingen voor en na de hoge afvoeren in december/januari 1994 en januari 1995 gaven geen grote sedimentatie ter plaatse van de geul te zien. Slechts een verschuiving van de geulligging was waarneembaar. De grootste bijdrage aan de sedimentatie in de geul vindt dus plaats bij gemiddelde afvoeren.

Een verdiepte geul had een te verwaarlozen invloed op de waterbeweging. Slechts lokaal traden verschillen op met waterbeweging in de huidige situatie. Dit komt omdat de roosterafstand misschien te groot is. De HV2-min variant van de MER Haringvlietssluisen gaf een beeld van grotere stroomsnelheden op het Hollandsch Diep en lagere stroomsnelheden op de Dordtsche Kil en de Nieuwe Merwede.

Bij de drie alternatieven zorgde alleen alternatief 2 (gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep) voor een gewijzigd beeld in de waterbeweging. Bij dit alternatief wordt de stroomsnelheid ter plaatse van de oversteek groter.

De berekende gemiddelde sedimentatie in de oversteek is ongeveer 0,24 mm/getij. In werkelijkheid is dit ongeveer 0,42 mm/getij. Dit komt neer op jaarlijks een sedimentatie van 0,17 m tegen 0,30 m in werkelijkheid.

Een verdiepte geul gaf een toename van 5 % in vergelijking met het nulalternatief. Opvallend was, dat ook het verschil tussen een 100 m en 200 m brede geul klein was. Bij de HV2-min variant waren de verschillen groter. De sedimentatie in het hele gebied wordt kleiner (ongeveer 10%) en de erosiesnelheid op de Dordtsche Kil neemt ook af. In de zeevaartgeul en in het Zuid-Hollandsch Diep sedimenteert gemiddeld echter wat meer

materiaal. Dit komt doordat de invloed van de Dordtsche Kil is afgenomen.

Bij alternatief 1, de onderwaterdam, is het verschil met het nulalternatief klein. Op de waterbeweging heeft dit alternatief nauwelijks effect. Alleen in de noordelijk deel van de oversteek nemen de stroomsnelheden toe, waardoor hier plaatselijk de ontgrondingskuil groter wordt. In de toekomst kan een modellering met een onderwaterdam met een hogere ligging meer effect hebben.

De gedeeltelijke afsluiting, alternatief 2, was de meest rigoureuze ingreep, maar ook de meest efficiënte. De afname van de sedimentatie is tussen de 30 en 50 %. In het Zuid-Hollandsch Diep zal alleen in de ingang meer gaan sedimenteren, maar zal gemiddeld de sedimentatie lager zijn.

Het laatste alternatief, de sedimentvang bovenstrooms van de zeevaartgeul, had weinig effect voor de zeevaartgeul. Het sediment dat opgevangen wordt komt in een normale situatie elders in het oostelijk deel van het Hollandsch Diep terecht. Bovendien is ook de randvoorwaarde op de Dordtsche Kil niet aangepast. Omdat er minder sediment uitgaat zal er ook minder sediment ingaan. De veranderingen in sedimentatie lagen in de orde van 4 à 5 % in de oversteek.

12 Aanbevelingen voor het verder onderzoek

De resultaten van mijn onderzoek heeft u kunnen lezen in de voorgaande hoofdstukken. Ik zou zeker willen adviseren om het onderzoek naar het sedimenttransport en de sedimentatie in het gebied verder door te zetten omdat de resultaten die gevonden tijdens dit onderzoek, aangeven dat door ingrepen in het gebied het baggerbezwaar omlaag kan gaan. Ik zou daarbij de volgende aanbevelingen willen doen:

-Er is nog te weinig bekend over de precieze sedimentbewegingen in het gebied in de directe omgeving van de zeevaartgeul. Tijdens dit onderzoek is aangenomen dat er bodemtransport is, maar dit is nooit aangetoond. Ook over oevererosie is weinig bekend. Het zandtransport in combinatie met slib moet ook nog beter bekeken worden. Vooral van het sedimenttransport bij hoge afvoeren is weinig bekend.

-Om de hoeveelheid handelingen en schijfruimte te beperken, moet zo snel mogelijk geprobeerd worden de water- en sedimentbeweging tegelijkertijd te berekenen. Het aantal van de 34 handelingen, die nodig waren om van invoer voor ZWENDL tot uitvoer van DELWAQ te komen, is veel te veel. Wanneer de gebruiker op een eenvoudiger en snellere manier tot resultaten kan komen, zal dit het verdere onderzoek ten goede komen.

-De resultaten van het onderzoek geven een goed beeld van de globale sedimentatie in het gebied. Op meer gedetailleerd niveau zijn de resultaten niet geheel naar verwachting. Het onderscheid tussen de zeevaartgeul en de omgeving is niet zo groot als in werkelijkheid en ook de sedimentatie in de diepe geulen en erosie in ondiepe gedeelten zijn niet duidelijk in de resultaten waarneembaar.

Een manier om zonder al te veel aanpassing in het model tot betere resultaten te komen is om een nabewerking toe te passen op de berekende resultaten. Bij de ééndimensionale modellering met ZWENDL en DELWAQ worden de resultaten uit DELWAQ nog aangepast met het programma RAMING. Dit programma zorgt dat in ondiepe gedeelten minder sedimentatie plaatsvindt dan in de diepere delen.

Een dergelijke **nabewerking** kan ook met de resultaten uit de tweedimensionale horizontale berekening gebeuren. Dit kan per segment of per meerdere segmenten. Op die manier kunnen processen zoals oevererosie en sedimentatie in diepe geulen beter gemodelleerd worden. Ook kan op deze manier de oversteek nauwkeuriger gemodelleerd worden.

-Als het bovengenoemde voorstel te weinig resultaat oplevert kan een meer ingrijpende verandering in de modellering betere resultaten opleveren. Met een **kleinere roosterafstand** kan de oversteek beter gemodelleerd worden. Dit zorgt wel voor langere rekentijden en een grotere uitvoer. Dit kan gecompenseerd worden door de water- en sedimentbeweging tegelijkertijd te berekenen.

-Naast een verkleining van de roosterafstand is het ook zinvol om het **zand- en bodemtransport** op een andere wijze te modelleren. Het sedimenttransport is gebaseerd op

een verticale uitwisseling van het bodemmateriaal met het materiaal in suspensie. Voor het zandtransport is dit geen ideale modellering.

Bij de modellering van het zandtransport moet niet de uitwisseling tussen bodem en suspensie als uitgangspunt genomen worden voor de berekening van de concentratie in de suspensie. De concentratie kan beter bepaald worden door uit de stroomsnelheid de meevoerende capaciteit te berekenen en daaruit de af- of toename van de bodem te bepalen. De grootte van het bodemtransport moet ook afhankelijk van de stroomsnelheid berekend worden, zodat alle fracties via bodemtransport getransporteerd kunnen worden. Bij deze berekening wordt dus met twee lagen gerekend: een laag voor het bodemtransport en een laag voor het sediment in suspensie. Meerdere lagen zullen tot langere rekentijden maar mogelijk ook tot betere resultaten leiden.

Over het zand- en bodemtransport in het Hollandsch Diep is weinig bekend. Uit verschillende metingen naar concentraties werd zand in het hele Hollandsch Diep aangetroffen. Van verschillende deskundigen heb ik echter vernomen dat alleen bij hoge afvoeren zand in het Hollandsch Diep aan te treffen is.

-Eventueel kunnen in de toekomst ook andere modelleringen gebruikt worden waarin bijvoorbeeld rekening wordt gehouden met turbulentie, scheepvaart, vloggroei en -grootte. Voor een situatie waarbij zoutindringing plaatsvindt is het verstandig ook het zoutgehalte en de verschijnselen rond het turbidity maximum in de modellering te betrekken.

Nawoord

Een jaar nadat ik ben begonnen bij Rijkswaterstaat als stagiaire komt de afronding van mijn afstudeeronderzoek in zicht. Vooraf had ik een aantal ideeën en een bepaalde verwachting. Sommige daarvan zijn uitgekomen, andere niet. Ik denk dat een afstudeeropdracht primair bedoeld is om er iets van te leren. Zelfstandig een onderzoek doen en de geleerde stof toepassen op een praktijkprobleem.

Één van de meest aantrekkelijke kanten van mijn afstudeeropdracht was dat ik met een echt probleem bezig was en dat ik met zoveel mensen, die buiten de universiteit werkzaam zijn in aanraking ben gekomen. Ik zou iedere student willen aanraden een stage in zijn of haar pakket op te nemen.

Vanuit Rijkswaterstaat en het IHM was het doel van mijn onderzoek om te bekijken of de sedimentatie in de zeevaartgeul niet verminderd kan worden en of een numeriek onderzoek vooraf hiervoor geschikt is. Ik denk dat een verder onderzoek zeker aan te bevelen is maar dat met de beperking van numerieke modellen rekening gehouden moet worden. Geen model is mooier dan de werkelijkheid behalve een fotomodel.

Met de gedachte dat er een vervolg op dit onderzoek komt heb ik dit rapport geschreven. Ik heb veel nadruk gelegd op mijn werkzaamheden en mijn keuzes en minder op de directe resultaten. Bovendien wil ik nog een handleiding schrijven, waarin gedetailleerd beschreven zal worden welke handelingen verricht moeten worden om goed werkende modellen en koppelingen te krijgen.

Ik hoop dat u dit rapport interessant vond om te lezen en dat u er wat aan heeft gehad.

Literatuurlijst

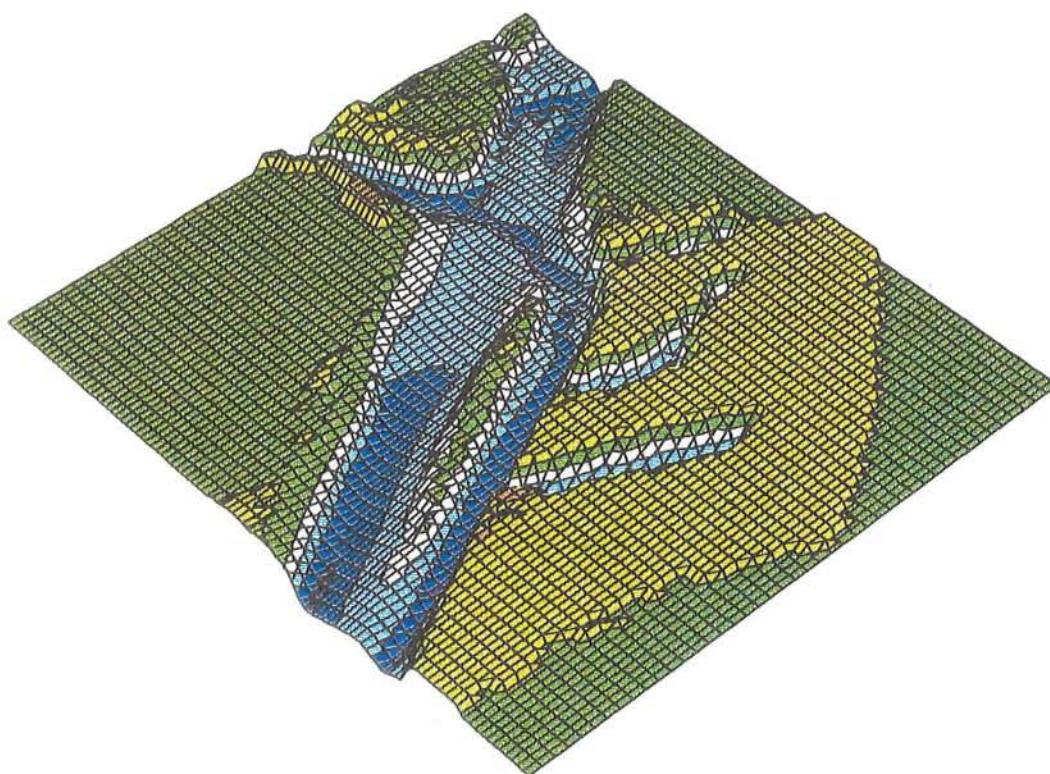
- Allersma, E., Waterloopkundig Laboratorium, *Morfologisch Onderzoek Noordelijk Deltabekken, morfologische modellering*, Deel I t/m IV, september 1988
- Breusers, H.N.C., en A.J. Raudkivi, *Scouring*, IAHR hydraulic structures design manual 2, Balkema, Rotterdam, 1991
- Bol, R., RIZA vestiging Dordrecht, *Zout, maar niet te zout, Onderzoek naar een nieuwe bedieningsprogramma voor de Haringvlietssluisen in het kader van het Integraal Beleidsplan Haringvliet, Hollandsch Diep, Biesbosch*, nota 93.009, augustus 1993
- Bijker, E.W., *Sedimentation in Channels and Trenches*, Proceedings 17th International Conference on Coastal Engineering, Sydney, Volume II, Chapter 104, pag.1708-1718
- Collard, E.A., RIZA vestiging Dordrecht en ingenieursbureau Svasek BV, *Een rechtlijnig WAQUA-model van het Haringvliet-Hollandsch Diep: Modelbouw, afregeling, en verificatie*, december 1991
- Collard, E.A., RIZA vestiging Dordrecht en ingenieursbureau Svasek BV, *SINODE, een 2DH Delwaq-model van het Haringvliet/Hollandsch Diep, Modelbouw en Gevoeligheidsonderzoek*, werkdocument 92.104x, augustus 1992
- Dronkers, J.J., *Tidal computations in rivers and coastal waters*, Amsterdam, 1964
- Dyer, K.R., 'Fine Sediment Particle Transport in Estuaries'. In: J.J.Dronkers, en W.van Leussen, *Physical Processes in Estuaries, papers presented at an international symposium on physical processes*, 1988, pag. 295-308
- Gunnink, J.L., L. Hazelhoff, en P. Tempel, Universiteit Utrecht, *De kwaliteit van de waterbodem in de Nieuwe Merwede in het kader van het Nader Onderzoek*, eindrapportage en bijlagen, maart 1993
- Haring, J, *De geschiedenis van de ontwikkeling van de waterbeweging en het profiel van de rivieren in het Noordelijk Deltabekken over de perioden 1870-1990-1976*, Nota 44.011.02 deel I en II, dir.Waterhuishouding en Waterbeweging district Zuid-West, juni 1977
- Hoefsloot, F., en L. Hazelhoff, Universiteit Utrecht, fac. Der Ruimtelijke Wetenschappen, vakgroep Fysische Geografie, *De kwaliteit van de waterbodem in het Hollandsch Diep en de Dordtsche Biesbosch in het kader van het Nader Onderzoek*, eindrapportage en bijlagen, november 1994
- Houweling, F., 'Vervuilde baggerspecie levert bruikbaar zand'. In: Technisch Weekblad, 22 november 1995

- ICIM, Informatica Centrum voor Infrastructuur en Milieu, *WAQUA-unix version, Users Guide I en II*, 1991/1992
- IHM, Moerdijk Magazine, 1992 en 1993a
- IHM, *Notitie Zeehaven Moerdijk*, 1993b
- Jansen, M.H.P., *Zeevaartgeul Moerdijk*, Tussenrapport 1 deel 1 en 2, maart/april 1995
- Jansen, P.Ph., Vries, M.de, *Principals of River Engineering, The non-tidal alluvial river*, 1979
- Krone, R.B., University of California, *Flume studies of the transport of sediments in estuarial shoaling processes*, Final report, Berkley, California, juni 1962
- Kuijper, C., J.M.Cornelisse, J.C.Winterwerp, Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium, Cohesive Sediments, report 27 en 28, *Erosion and deposition characteristics of natural muds, Sediments from the Hollandsch Diep (Moerdijkbruggen en Sassenplaat)*, nov.1990
- Kuijper, C., J.M.Cornelisse, J.C.Winterwerp, Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium, Slibonderzoek, rapport 44, *Toepassing vloksterkteverdelingen in DELWAQ en gevoeligheidsonderzoek*, maart 1993
- Langendoen, E.J., *Flow patterns and transport of dissolved matter in tidal harbours*, 1992
- Leussen, W. van, 'Aggregation of Particle, Settling of Mud Floccs, a review'. In: J.J.Dronkers, en W.van Leussen, *Physical Processes in Estuaries, papers presented at an international symposium on physical processes*, 1988, pag. 347-397
- Partheniades, E., University of California, *A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water*, PhD Disertation, 1962
- Rijkswaterstaat dir. Benedenrivieren afd. Rivierkunde, *Evaluatie bodemontwikkeling van het Hollandsch Diep in de periode 1971-1982*, nota LTL/84-16, september 1984
- Rijkswaterstaat en gemeente Rotterdam, G.van Bochoven et al., *Minimalisering Kosten Onderhoudsbaggerwerk (MKO)*, mei 1987
- Rijkswaterstaat dir. Benedenrivieren, afd. Kennis en informatiesystemen (AXK), *Waterbeheersing Noordelijk Deltabekken m.b.v. lozingsprogramma Haringvlietluizen (LPH-84), verticale en horizontale waterbeweging*, oktober 1987
- Rijkswaterstaat dir. Zuid-Holland meetdienst NDB, *Waterbodembemonstering, Morfologisch Onderzoek*, december 1989

- Rijkswaterstaat dir. Zuid-Holland afd. Watersysteemkennis (APS), P.F.van Dreumel en A.Dekker, *Bodemontwikkeling Noordelijk Deltabekken*, december 1990
- Rijkswaterstaat, dir. Zuid-Holland en Meetkundige Dienst, *Geomorfologische kartering van Haringvliet, Hollandsch Diep, Nieuwe Merwede en Amer*, oktober 1992a
- Rijkswaterstaat dir. Zuid-Holland, afd. Watersysteemkennis (APS), P.F.van Dreumel, *Baggerprognoses verdiepte zeevaartgeul Hollandsch Diep*, Nota APS/92-328, 1992b
- Rijkswaterstaat, dir. Zuid-Holland, afdeling AVS, *Scheepvaartwaarnemingen 1992*, 1992c
- Rijkswaterstaat, dir. Zuid-Holland, afd. Watersysteemkennis (APS), *Onderzoek naar de noodzaak tot tegengaan van de erosie in de Oude Maas*, nota APS/94-123, augustus 1994
- Rijkswaterstaat, dir. Zuid-Holland, afd. APV, *Waterbodems in de opruiming*, nummers 1 tm. 3, 1995a
- Rijkswaterstaat, dir. Zuid-Holland, afd. Watersysteemkennis (APS), P.F. van Dreumel, *Slib- en zandbeweging in het noordelijk Deltabekken in de periode 1982-1992*, december 1995b
- Velzen, E.H. van, RIZA, *Stuurparameters in de slibmodellering van het project Stofstromen*, notitie WSD88-025, maart 1988
- Verbeek, H., RIZA vestiging Dordrecht, *Onderzoek naar theoretische aspecten van DELWAQ*, werkdokument 90.138x, september 1990
- Verbeek, H., RIZA vestiging Dordrecht, *Metingen met de 'VIS' (Video-In-Situ-systeem) in het Hollandsch Diep en het Volkerakmeer*, november 1991
- Verbeek, H., B. Jansen, RIZA vestiging Dordrecht, *Hoge afvoer in de Maas, januari 1993: slibmeting in het Noordelijk Deltabekken*, werkdokument 93.141x, november 1993
- Verbeek, H., B. Jansen, RIZA vestiging Dordrecht, *Hoge afvoermetingen in maart 1988*, werkdokument 94.141x, april 1994a
- Verbeek, H., RIZA vestiging Dordrecht, *Meetplan voor calibratie van het WAQUA-SINODE model*, augustus 1994b
- Waterloopkundig Laboratorium (WL), *Delwaq 3.05, Quick Reference Guide*
- Waterloopkundig Laboratorium (WL), *Delwaq, version 3.0, User's manual*, maart 1990
- Witteveen, B., J.van Meegen, en R. Struijk, RIZA vestiging Dordrecht, *Gebruikersdocumentatie ZWENDL 3.00*, april 1992

Zeevaartgeul Moerdijk

bijlagen



Maarten Jansen

april 1996

Afstudeerproject
Zeevaartgeul Moerdijk
Bijlagen

Maarten Jansen

april 1996

afstudeercommissie:
prof.ir. K. d'Angremond, voorzitter
dr.ir. C. Kranenburg
ir. T. van der Meulen
ir. F. van Roode
drs. H. Verbeek

Voorwoord Bijlagen

Dit deel bevat de bijlagen die horen bij het hoofdrapport van mijn afstuderen. Ik heb gekozen voor een opzet waarbij ik in het hoofdrapport een aantal figuren heb geplaatst die de tekst kunnen verduidelijken en in de bijlage de overige figuren. Dit zijn bijvoorbeeld de resultaten van mijn onderzoek.

Naast figuren bevatten de bijlagen ook delen tekst. In bijlage I zijn figuren geplaatst waarnaar in de hoofdstukken 1 en 3 verwezen wordt. Dit zijn figuren die te maken hebben met de water- en sedimentbeweging voor en na 1970. Ook de profielen van inhoudsveranderingen van het gebied zitten in bijlage I.

In bijlage II en III zijn de programma's ZWENDL en WAQUA beschreven.

Een uitleg over de stortlokaties voor vervuild sediment en de criteria ervoor zit in bijlage IV. In de bijlagen V, VI en VII zijn de resultaten van de berekeningen gepresenteerd.

Inhoudsopgave Bijlagen

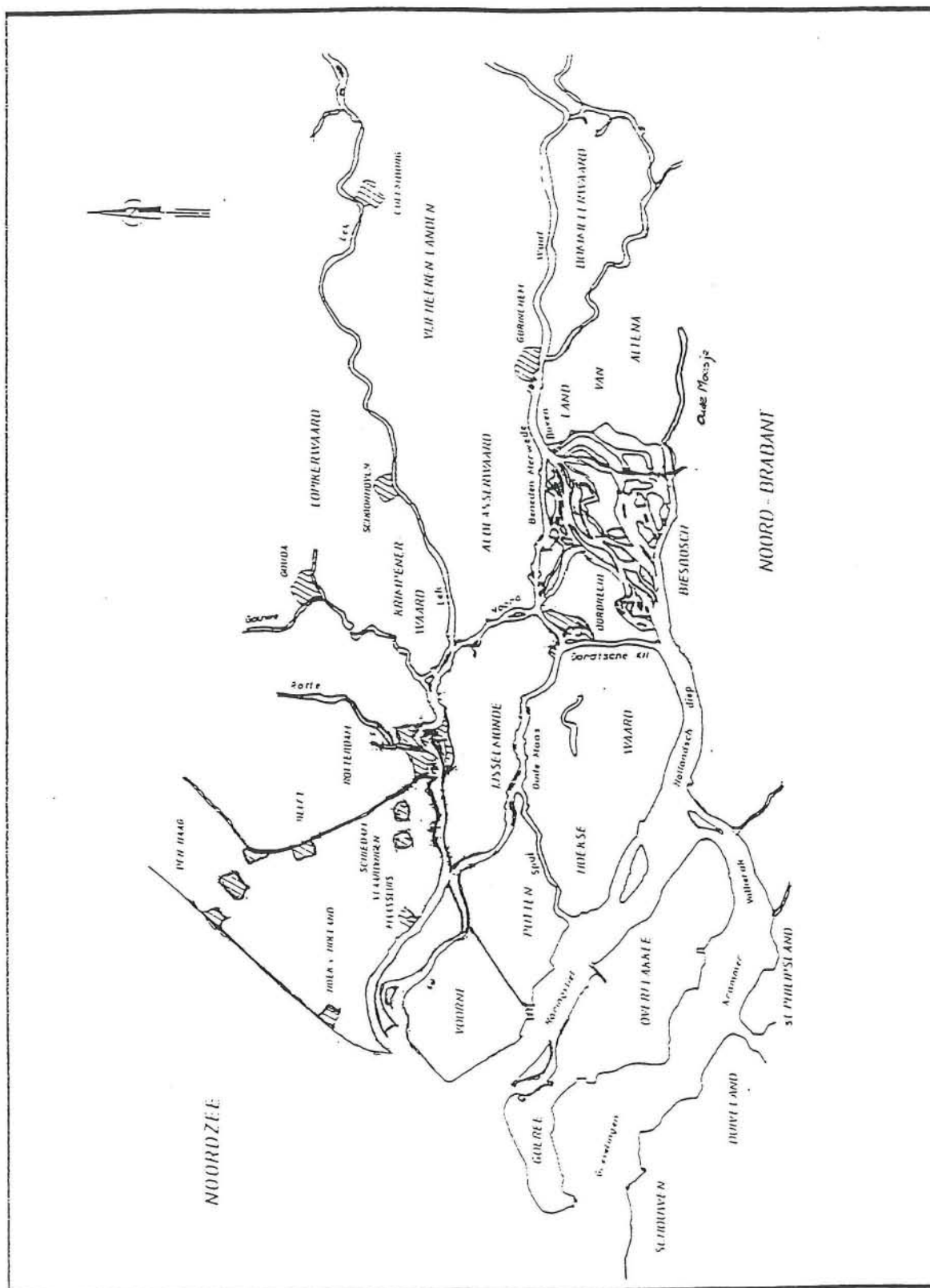
Voorwoord Bijlagen	1
Inhoudsopgave	2
Bijlage I	5
I.1 Historische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken	5
situatie in 1858	5
situatie in 1900	6
situatie in 1950	7
situatie in 1994	8
I.2 Optredende stroomsnelheden (in m/s) voor en na 1970	9
I.4 Getijvolumina (in 10^6 m^3) voor en na 1970	11
I.5 Sedimentbeweging en sedimentatie in periode 1960-1968	12
I.6 Sedimentbeweging en sedimentatie in periode 1972-1973 en 1982-1989	13
I.7 Hoogtemodel Hollandsch Diep	14
I.8 Profielverandering 1930-1969 Anna Jacominaplaat-Moerdijk	15
I.9 Profielverandering na 1970	16
I.10 Ligging meetraaien van sedimentatie in gebied	17
I.11 Ligging meetpunten waterstanden stroomsnelheden in gebied	18
Bijlage II ZWENDL	19
II.1 Fysische achtergrond ZWENDL	20
II.2 Randvoorwaarden ZWENDL	22
Bijlage III WAQUA	23
III.1 Achtergrond WAQUA	23
III.1.1 Fysische achtergrond WAQUA	23
III.1.2 Numerieke achtergrond WAQUA	24
III.2 Rechthoekige en kromlijnige modellering WAQUA	26
III.3 Randvoorwaarden WAQUA	28
Bijlage IV Toetsing baggerspecie voor stortlocaties	31
IV.1 Toetsing Grootschalig Locatie - Papegaaiebek	35
IV.2 Toetsing Cromstrijen	38
IV.3 Licht vervuild sediment	42
IV.4 Nieuwe stortlocaties	42

Bijlage V Resultaten Rijnafvoer 2200 m ³ /s	43
V.1.1 Stroombeeld Nulalternatief	43
V.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt	47
V.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalt.	51
V.2.1 Waterbeweging met verdiepte geul	55
Waterstand Dordtsche Kil	55
Waterstand Moerdijk	55
Stroomsnelheden oversteek midden	55
Stroomsnelheden Zuid-Hollandsch Diep	55
V.3.1 Waterbeweging met alternatief 1	56
Waterstand Moerdijkbruggen	56
Waterstand Kop van het Land	56
Stroomsnelheden onderwaterdam zuid en midden	56
Stroomsnelheden Amer	57
Stroomsnelheden onderwaterdam noord	57
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	57
Stroomsnelheden Dordtsche Kil	57
V.4.1 Stroombeeld alternatief 2	58
V.4.2 Waterbeweging alternatief 2	62
Waterstand Zuid-Hollandsch Diep	62
Waterstand Dordtsche Kil	62
Stroomsnelheden Hollandsch Diep midden	62
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	62
Stroomsnelheden Hollandsch Diep west	63
Stroomsnelheden oversteek zuid	63
Stroomsnelheden oversteek midden	63
Stroomsnelheden oversteek noord	63
V.4.3 Sedimentatie bij alternatief 2	64
V.5.1 Waterbeweging bij alternatief 3	65
Stroomsnelheden oversteek noord	65
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	65
Stroomsnelheden Amer	65
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	65
V.5.2 Sedimentatie bij alternatief 3	66
 Bijlage VI Resultaten Rijnafvoer 3500 m ³ /s	 67
VI.1.1 Stroombeeld Nulalternatief	67
VI.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde	71
VI.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij	75
VI.2.1 Spuibeheer Haringvlietsluizen voor HV2-min variant	77
VI.2.2 Randvoorwaarden WAQUA voor HV2-min variant	78
VI.2.3 Stroombeeld voor HV2-min variant	79

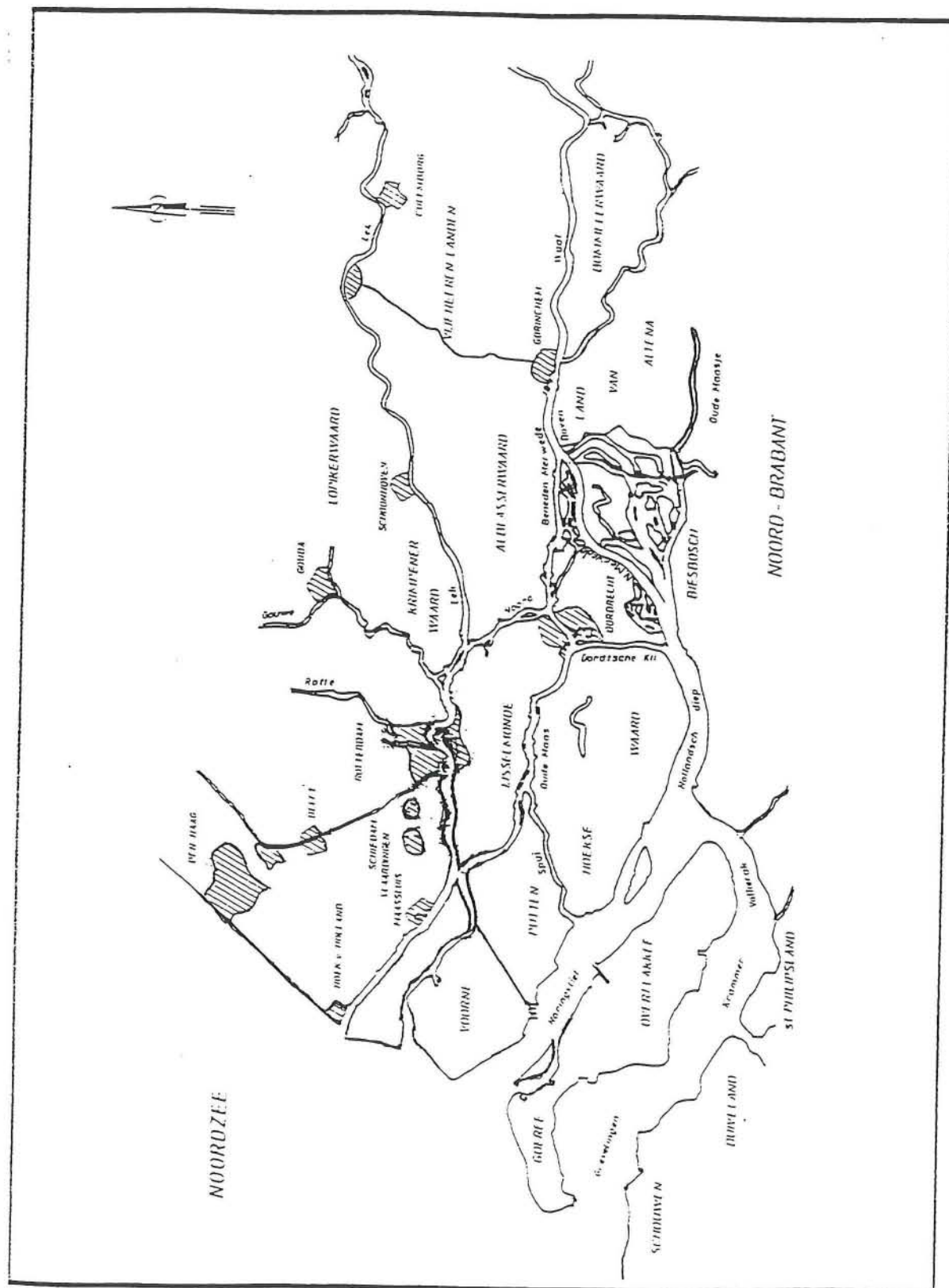
VI.2.4 Waterbeweging voor HV2-min variant	83
Waterstand Dordtsche Kil	83
Waterstand Moerdijk	83
Waterstand Kop van het Land	83
Waterstand Keizersveer	83
Waterstand Hollandsch Diep	84
Stroomsnelheden oversteek noord	84
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	84
Stroomsnelheden Hollandsch Diep west	85
Stroomsnelheden Zuid-Hollandsch Diep	85
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	85
Stroomsnelheden Dordtsche Kil	85
Stroomsnelheden Amer	86
VI.2.5 Sedimentatie HV2-min variant	87
Bijlage VII Resultaten Rijnafvoer 5000 m ³ /s	89
VII.1.1 Stroombeeld Nulalternatief	89
VII.1.2 Sedimentatieverloop gedurende het getijde	93
VII.3.1 Waterbeweging alternatief 1	97
Waterstand Moerdijkbruggen	97
Stroomsnelheden Zuid-Hollandsch Diep	97
Stroomsnelheden Dordtsche Kil	97
Stroomsnelheden onderwaterdam zuid	98
Stroomsnelheden onderwaterdam midden	98
Stroomsnelheden onderwaterdam noord	98
Stroomsnelheden Hollandsch Diep oost	98
VII.4.1 Stroombeeld alternatief 2	99
VII.4.2 Waterbeweging alternatief 2	103
Waterstand Moerdijk	103
Waterstand Dordtsche Kil	103
Waterstand Kop van het Land	103
Waterstand Keizersveer	103
Stroomsnelheden oversteek zuid	104
Stroomsnelheden oversteek noord	104
Stroomsnelheden Hollandsch Diep west	104
Stroomsnelheden Amer	105
Stroomsnelheden Nieuwe Merwede	105
VII.4.3 Sedimentatie alternatief 2	106

Bijlage I

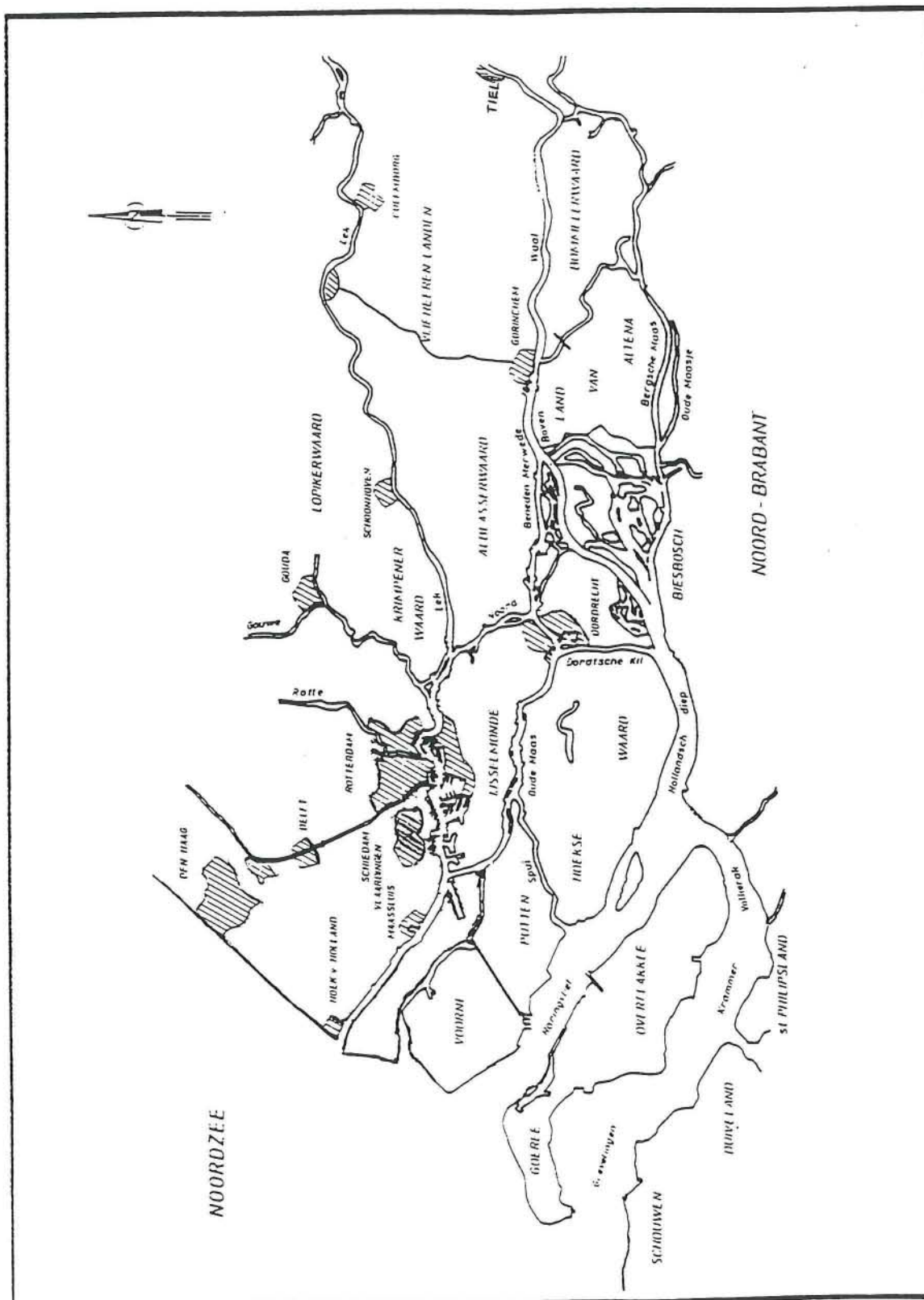
I.1 Historische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken, situatie in 1858



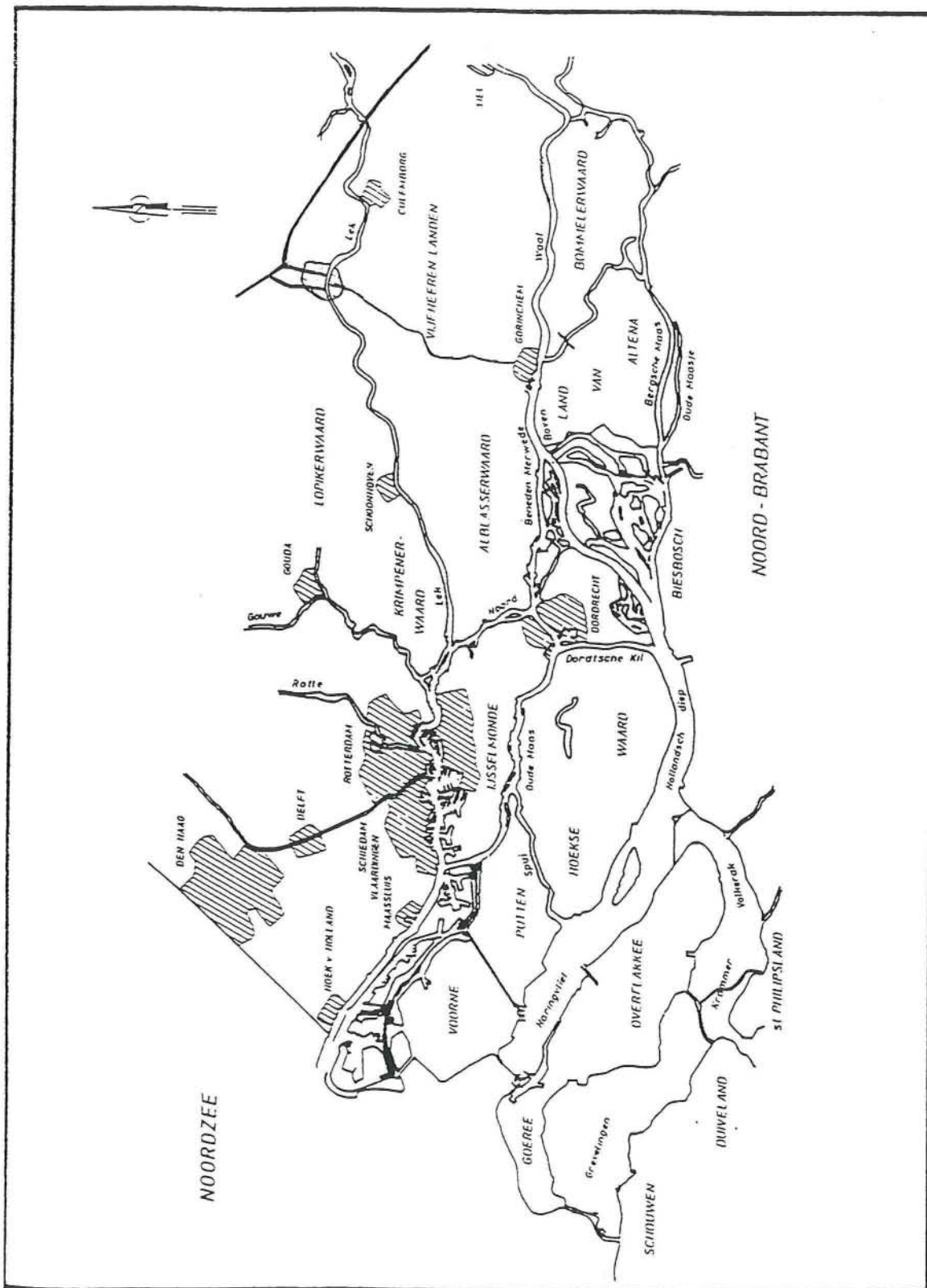
I.1 Historische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken, situatie in 1900



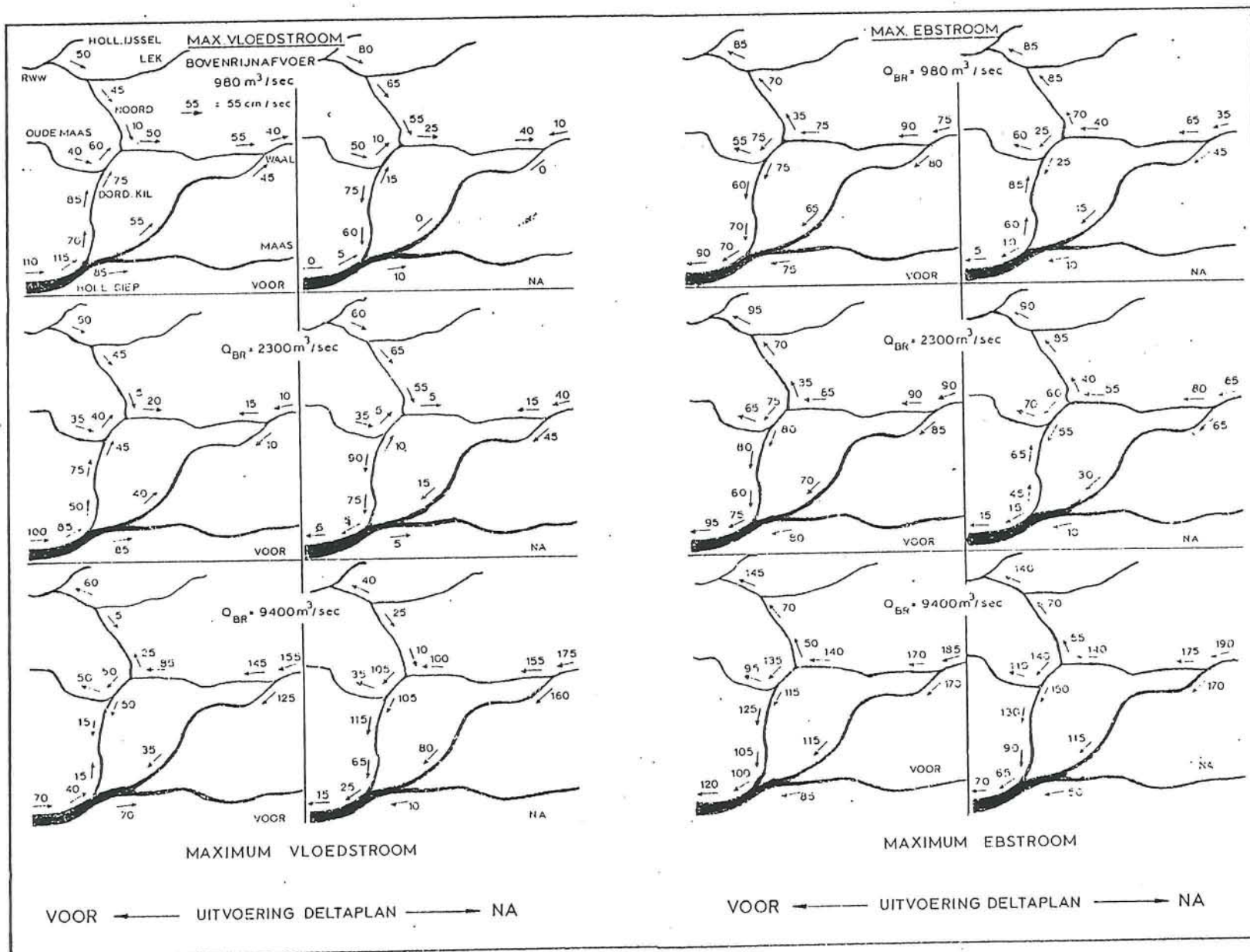
I.1 Historische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken, situatie in 1950



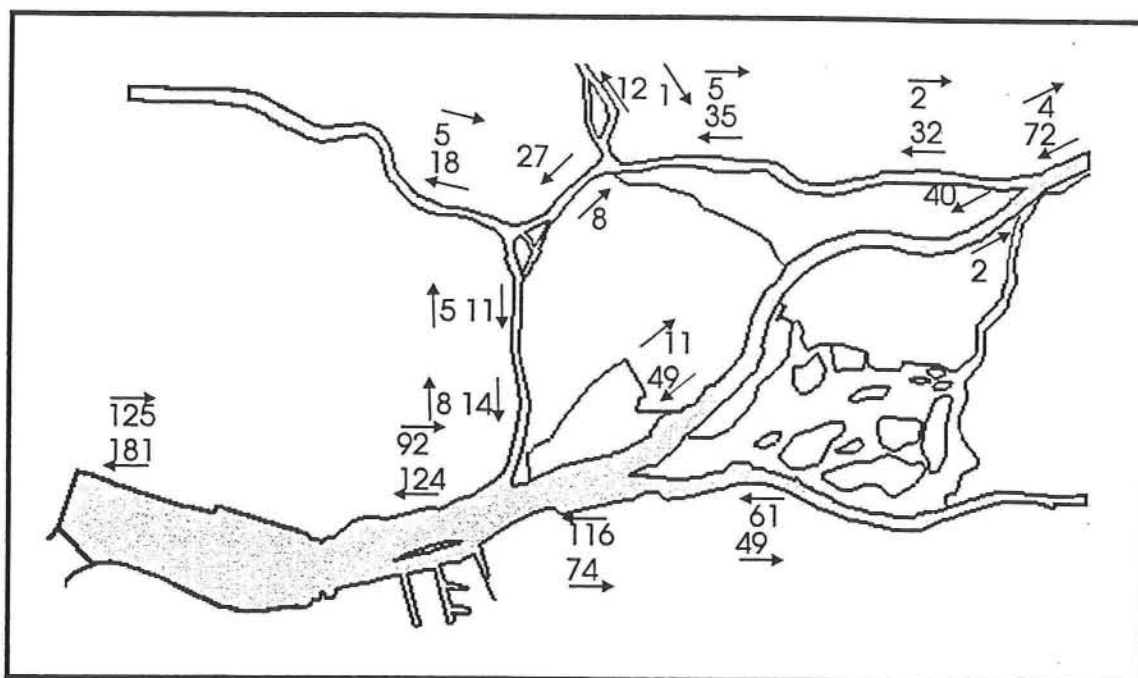
I.1 Historische ontwikkeling Noordelijk Deltabekken, situatie in 1994



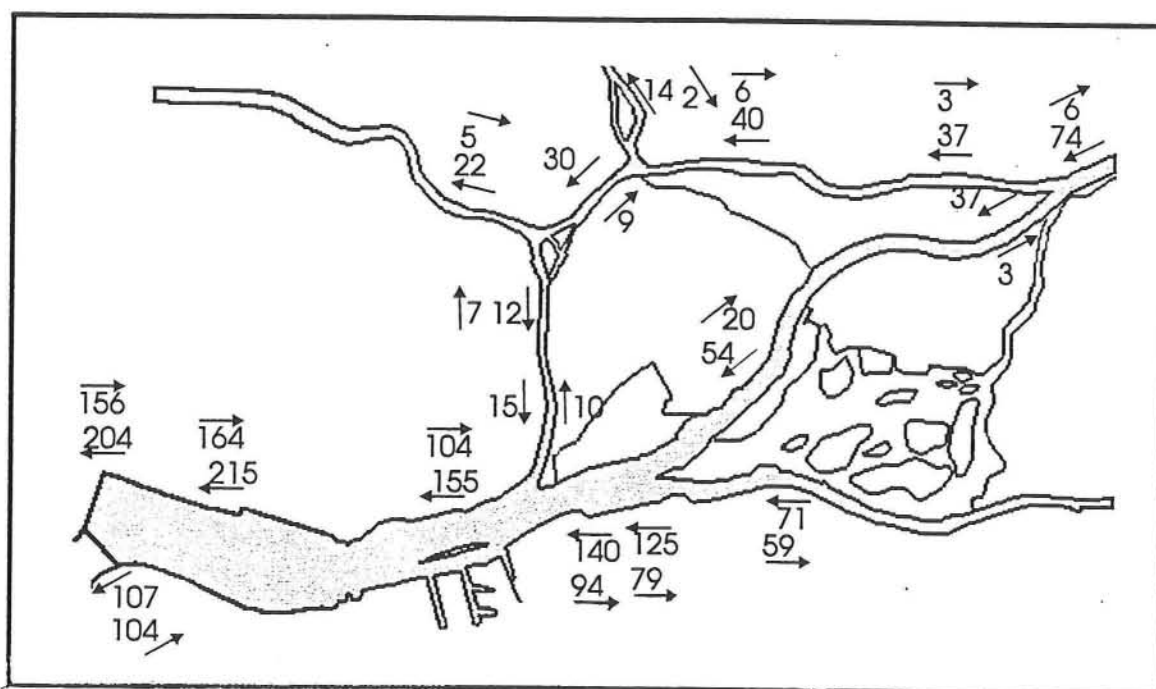
1.2 Optredende stroomsnelheden (in m/s) voor en na 1970 (uit Haring, 1977)



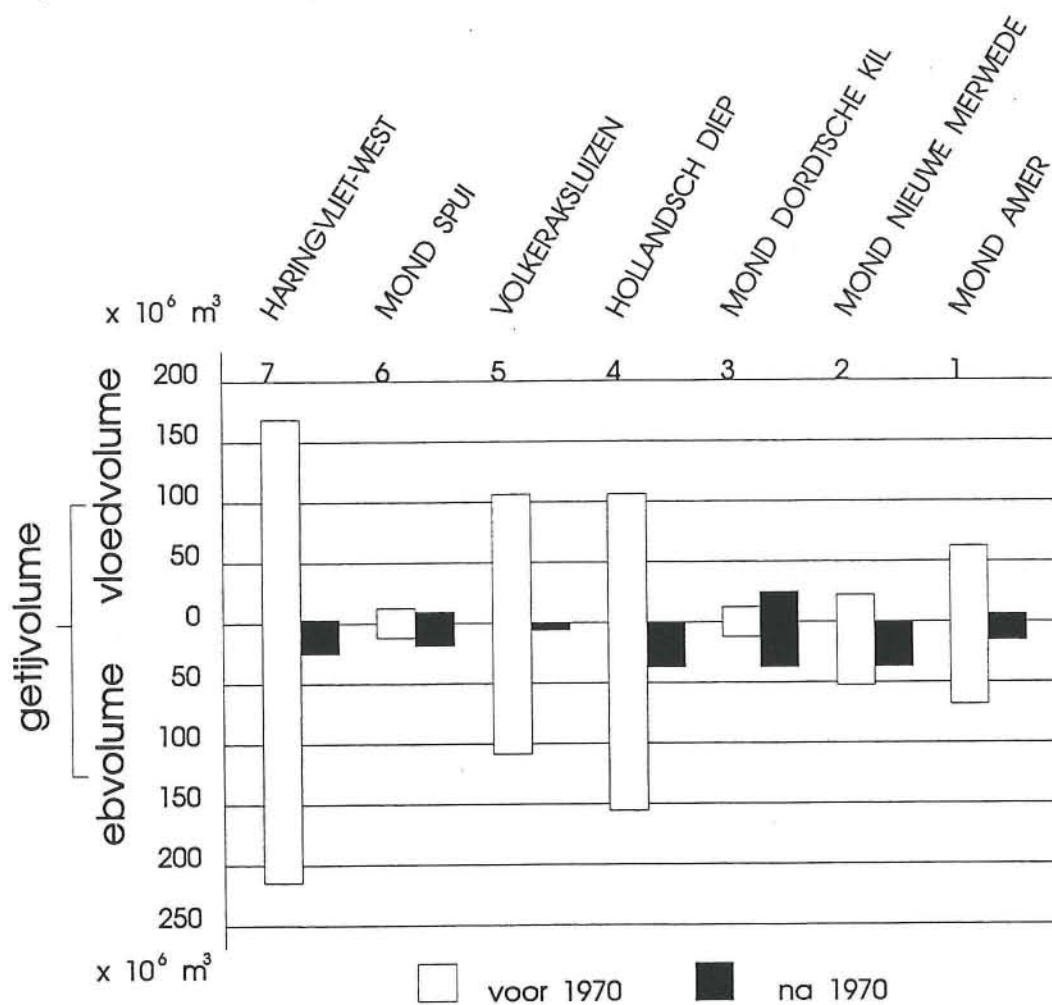
I.3 Getijvolumina (in 10^6 m^3) in 1934 en 1966 (uit Haring, 1977)



Getijvolumina (in 10^6 m^3) in 1934 (uit Haring, 1977)

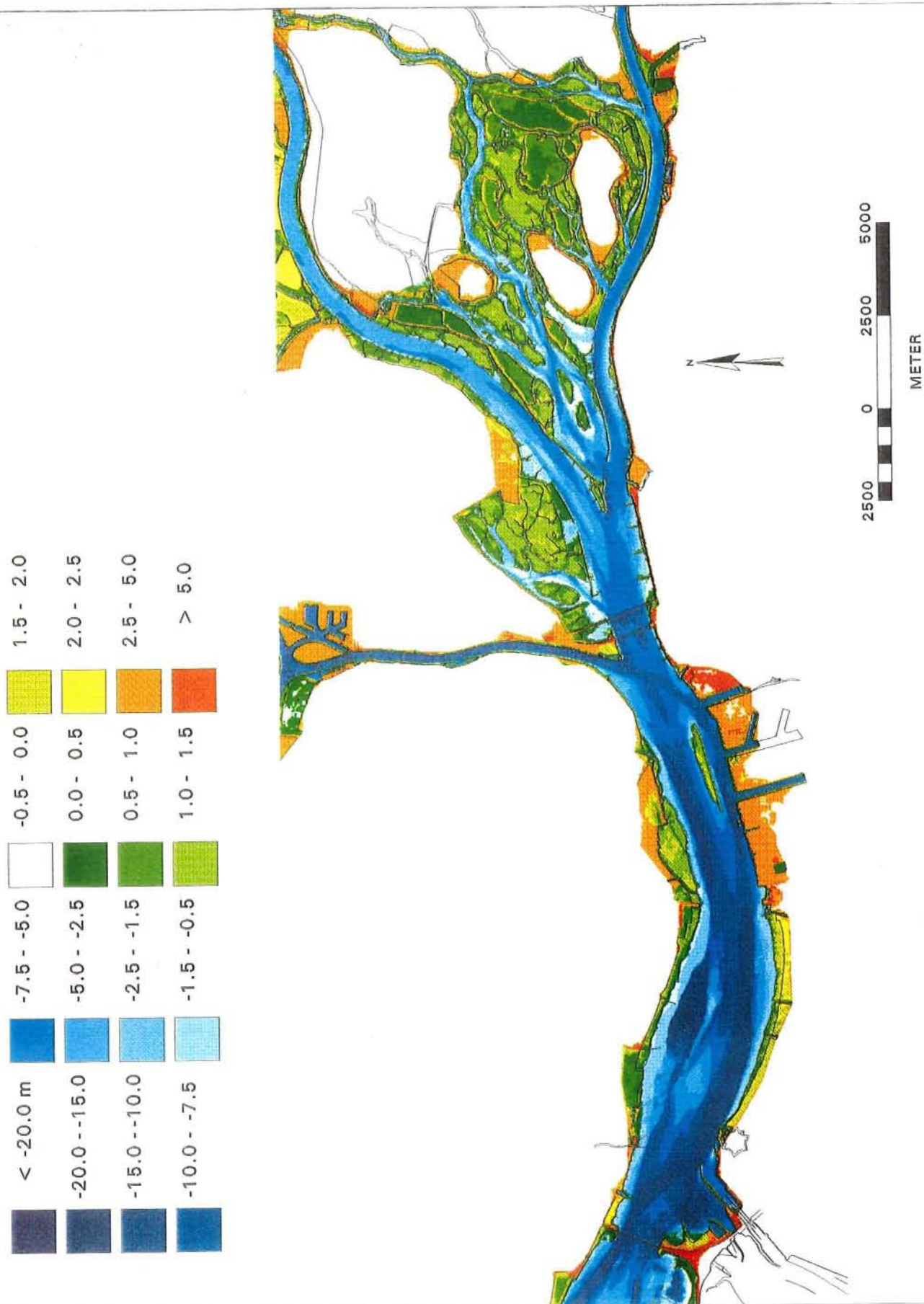


Getijvolumina (in 10^6 m^3) in 1966 (uit Haring, 1977)

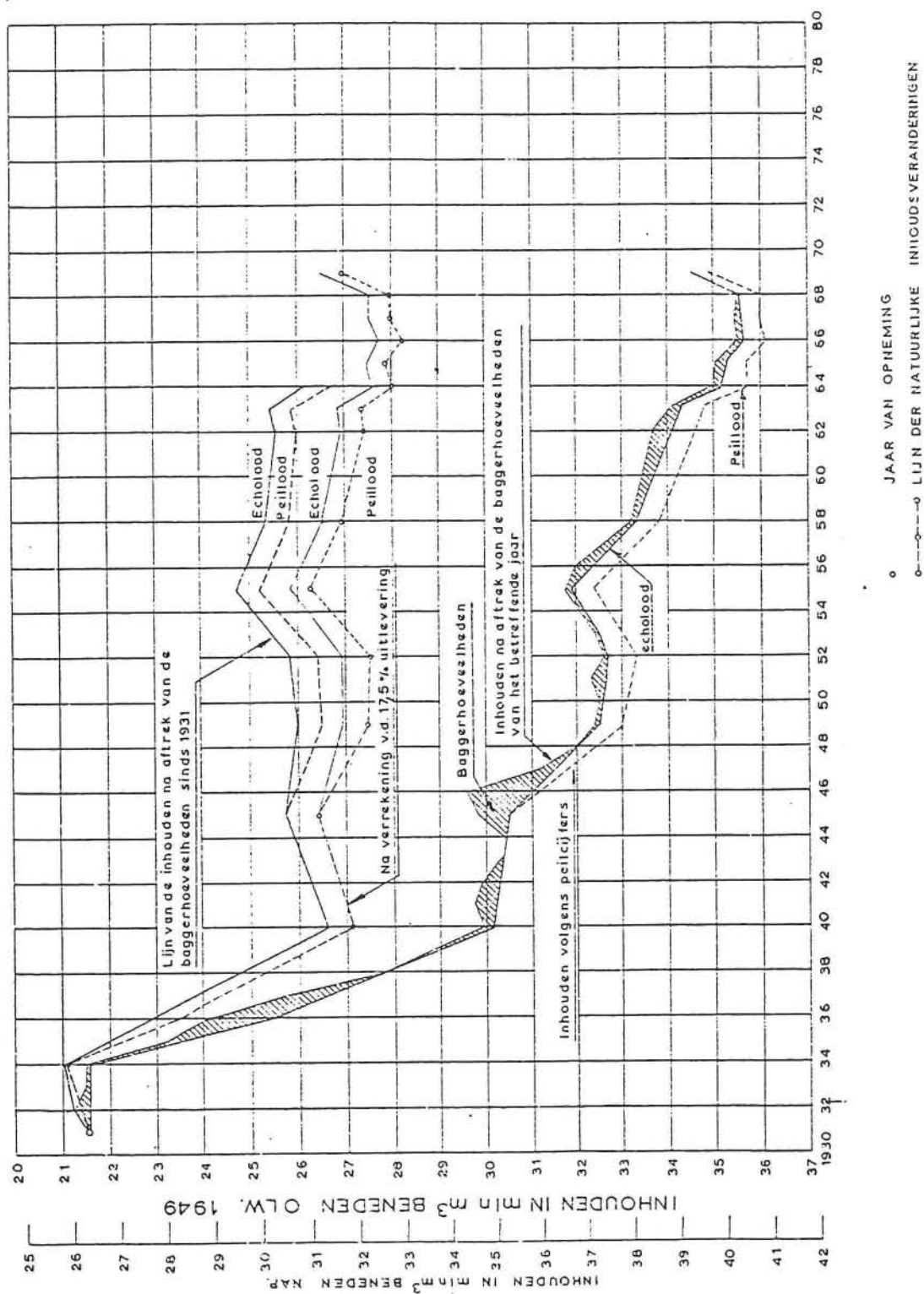
I.4 Getijvolumina (in 10^6 m^3) voor en na 1970 (uit RWS, Geomorfologische Kar., 1992a)

bron: Rijkswaterstaat "Geomorfologische kartering van Haringvliet, Holl. Diep, Nieuwe Merw. en Amer"

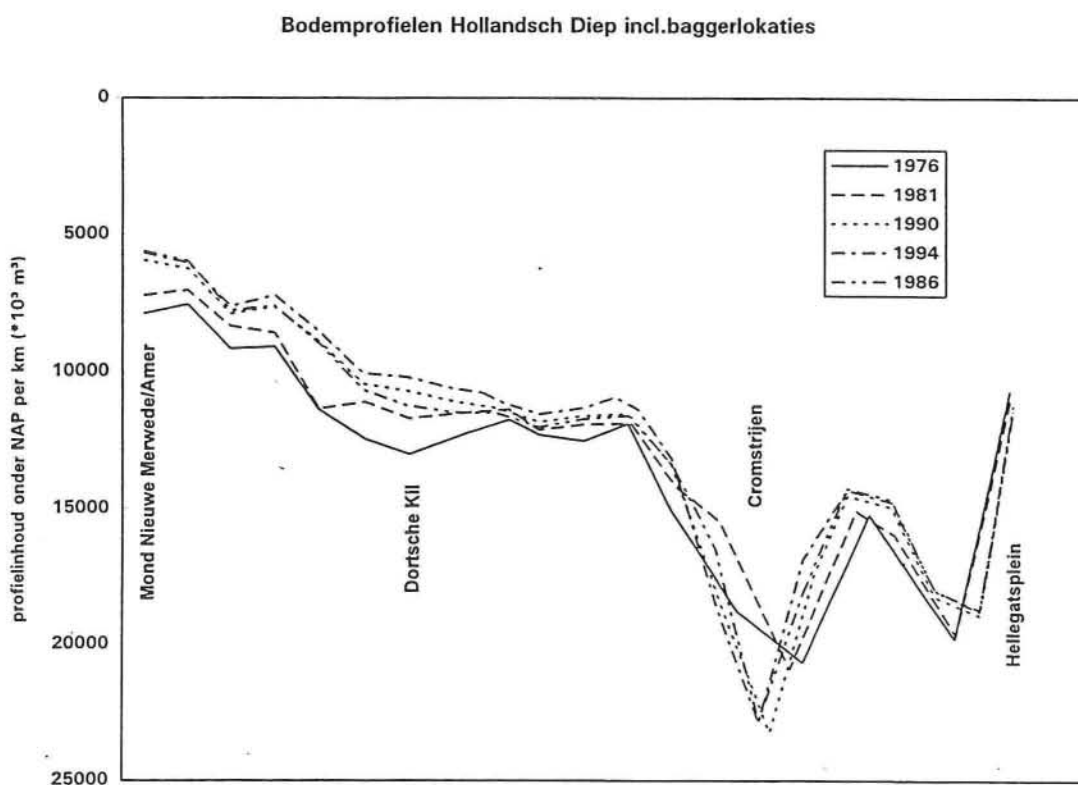
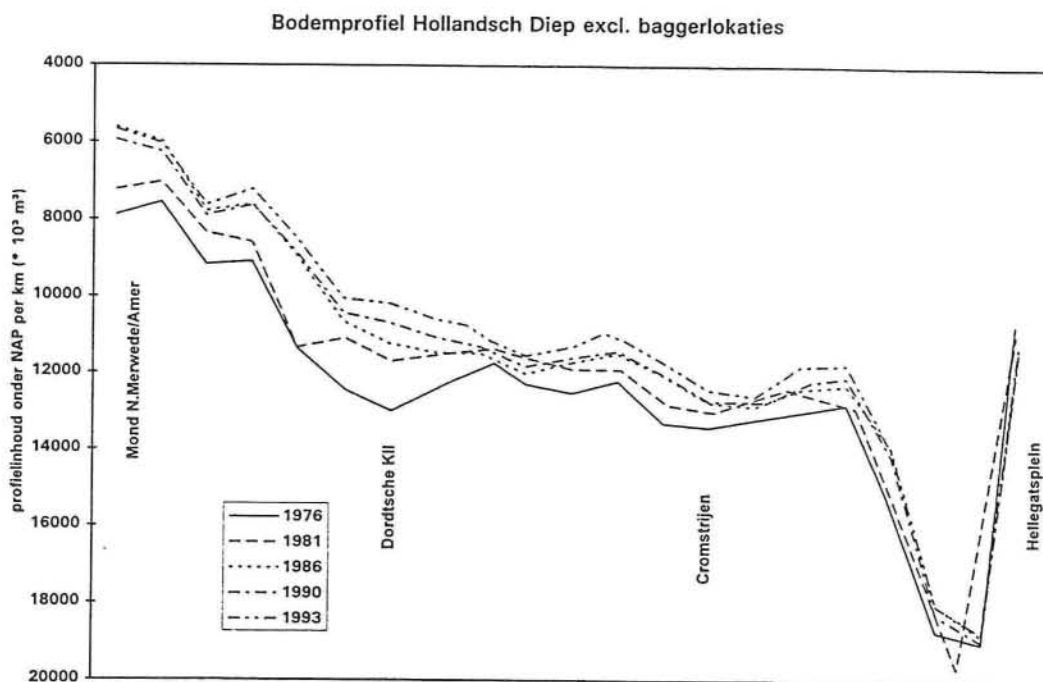
I.7 Hoogtemodel Hollandsch Diep



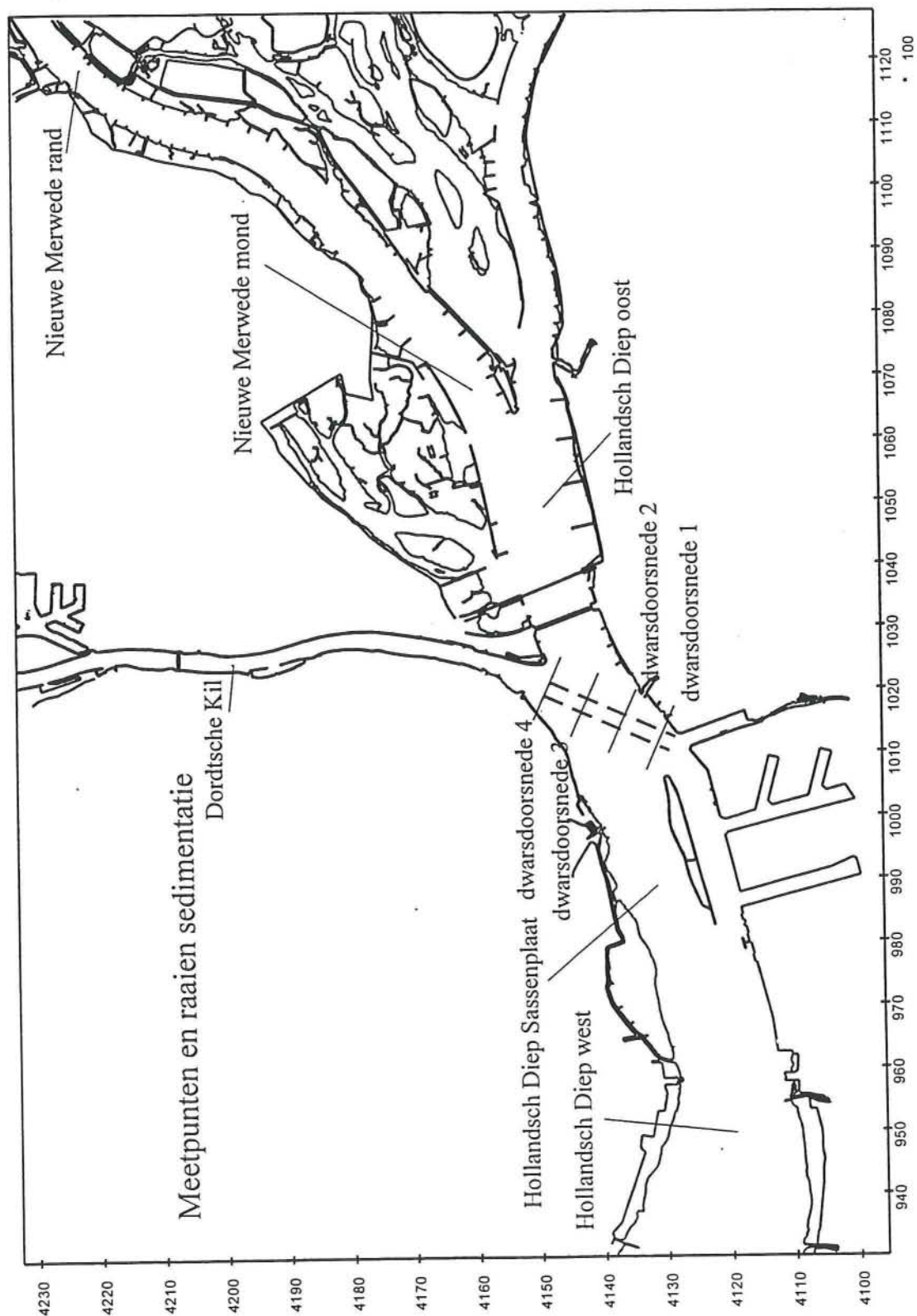
I.8 Profielverandering 1930-1969 Anna Jacominaplaat-Moerdijk (uit Haring, 1977)



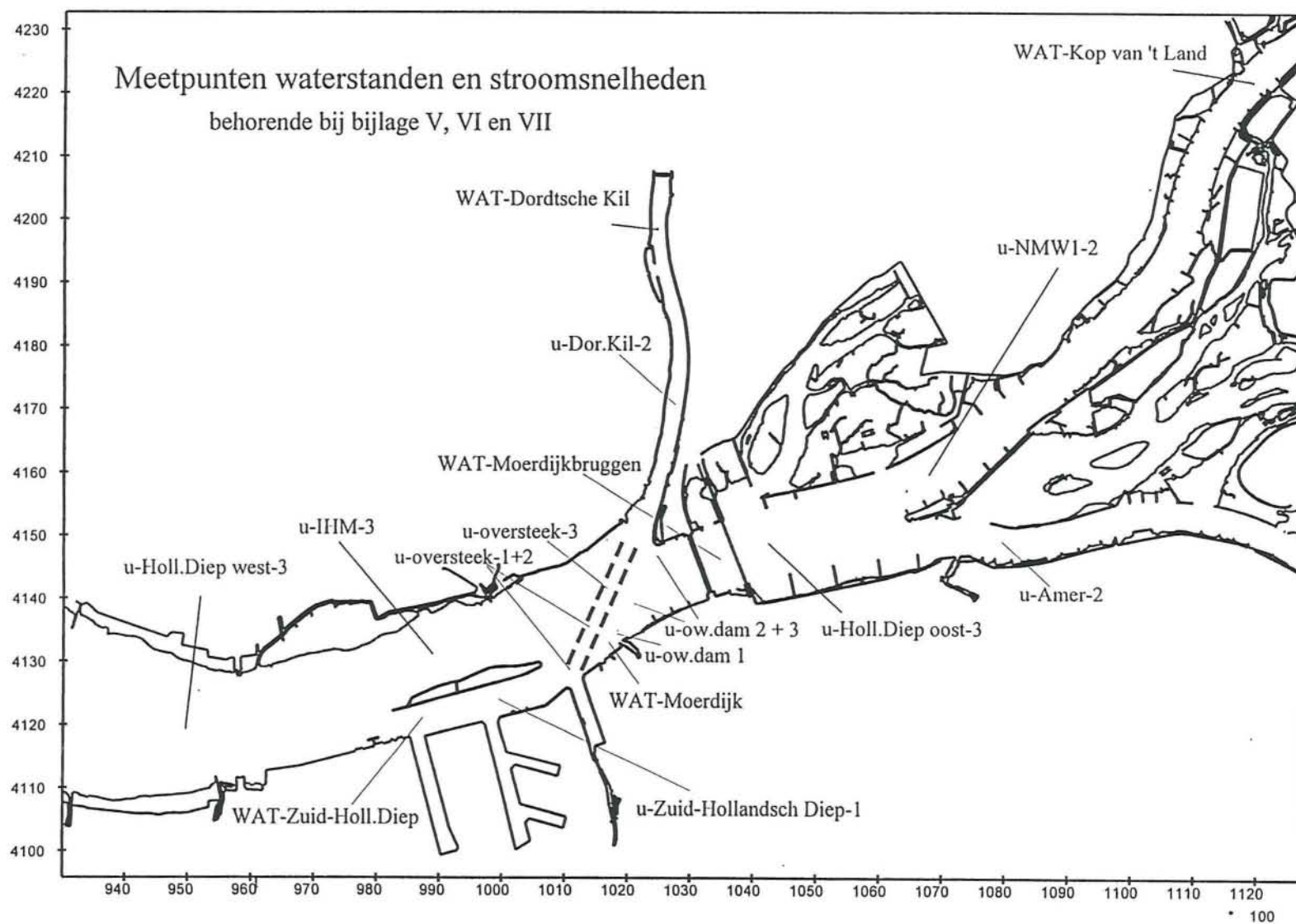
I.9 Profielverandering na 1970 (in beide figuren oversteek niet meegenomen)(uit RWS,1984 en peillodingen)



I.10 Ligging meetraaien van sedimentatie in gebied



I.11 Ligging meetpunten waterstanden stroomsnelheden in gebied



Bijlage II ZWENDL

ZWENDL (Zout en Waterbeweging EéNDimensionaaL) is een programmasysteem dat uit meerdere deelprogramma's bestaat. Het programma voert een ééndimensionale getijberekening uit op een gebied dat geschematiseerd is als een netwerk van open waterlopen. Alle snelheden hebben een richting evenwijdig aan de as van een waterloop. De snelheden zijn over een dwarsprofiel gelijk.

De onderdelen van het netwerk worden secties of vakken genoemd. Een sectie loopt van knooppunt tot knooppunt. Op een knooppunt kunnen 1 (rand), 2 (normaal) of meer (splitsingspunt) vakken aansluiten.

Met ZWENDL kunnen waterstanden (H), debieten (Q), (zout)concentraties (C) en snelheden (V) berekend worden. Deze kunnen voor alle vakken weggeschreven worden.

Voor het programma ZWENDL is een schematisatie gemaakt voor het gehele Noordelijk Deltabekken (zie hoofdrapport, figuur 5.4). Omdat dit model al een aantal jaren gebruikt wordt is het constant aangepast en verbeterd. Onder andere is er een aparte routine ontwikkeld voor het spuibeheer van de Haringvlietshuizen. Deze vele verbeteringen hebben ertoe geleid dat de modellering van het Noordelijke Deltabekken in ZWENDL op dit moment de meest gebruikte modellering is om waterstanden, concentraties enz. te berekenen voor de Deltabekken.

ZWENDL kan aan veel andere programma's gekoppeld worden. Ik heb de uitvoer van ZWENDL gebruikt om mijn randvoorwaarden voor het programma WAQUA (2-dimensionale modellering) te berekenen. Ook kan de uitvoer van ZWENDL fungeren als invoer voor het programma DELWAQ, dat sedimenttransport kan berekenen.

literatuur:

-Witteveen, B., Meegen, J.van, Struijk, R., RIZA vestiging Dordrecht, "Gebruikersdokumentatie ZWENDL 3.00", april 1992

-Stelling, G.S., Booij, N., Technische Universiteit Delft, "Computational modelling in open channel hydraulics", collegedictaat B84, februari 1993

II.1 Fysische achtergrond ZWENDL

Uitgangspunt voor de berekening met ZWENDL vormen de vergelijkingen voor ééndimensionale niet-stationaire stroming en de convectie-diffusievergelijking:

bewegingsvergelijking

$$\frac{\delta Q}{\delta T} + \frac{\delta(Q \cdot V)}{\delta X} + \frac{A}{\rho} \cdot \frac{\delta P}{\delta X} + \frac{A \cdot g \cdot V |V|}{C^2 \cdot R} = \frac{A \cdot \gamma \cdot V_w^2 \cdot \cos(\theta - ASR)}{DPTE}$$

continuïteitsvergelijking

$$\frac{\delta Q}{\delta X} + \frac{BB}{\cos(I)} \cdot \frac{\delta H}{\delta T} = 0$$

advectie-diffusievergelijking

$$\frac{\delta C_0 \cdot A}{\delta T} + \frac{\delta C_0 \cdot Q}{\delta X} + \frac{C_0}{\gamma_c} = \frac{\delta(E \cdot A \cdot (\delta C_0 / \delta X))}{\delta X}$$

waarin:

Q	: debiet
T	: tijd
V	: snelheid in lengterichting vak
X	: afstand
H	: waterstand
A	: doorsnede-oppervlak
ρ	: dichtheid
γ	: windconversie-coëfficiënt
P	: druk
g	: gravitatieversnelling
C	: Chezy-coëfficiënt
R	: hydrologische straal
V_w	: windsnelheid
θ	: windrichting
DPTE	: waterdiepte
I	: bodemverhang
ASR	: asrichting tov. noord
BB	: bergende breedte
C0	: concentratie
E	: dispersie coëfficiënt
γ_c	: afbraakcoëfficiënt van stof

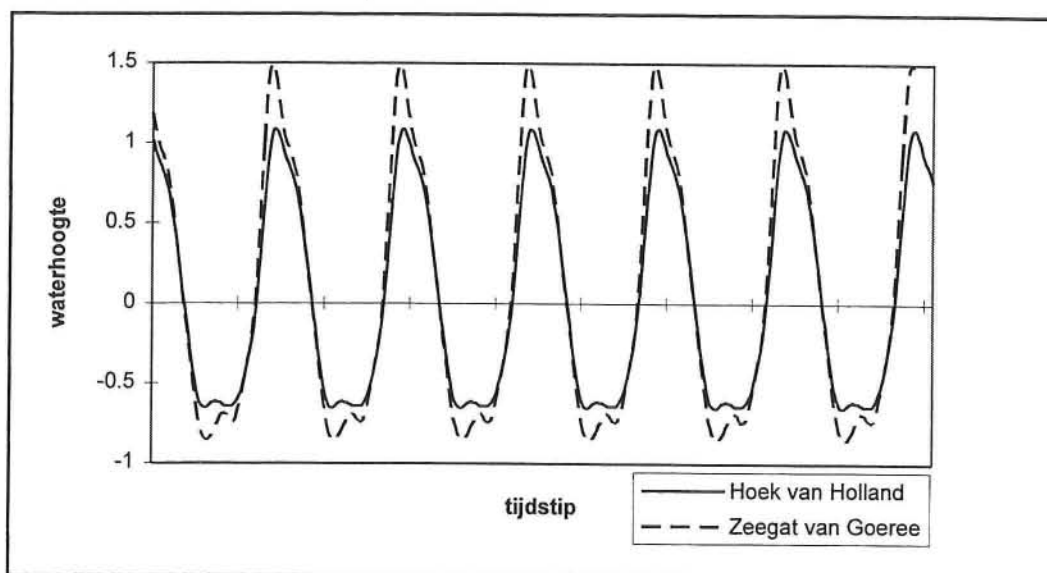
met $\rho = 1,32 \cdot C_0 + 1.000$

Deze vergelijkingen worden gediscretiseerd en gelineariseerd uitgaande van het derde impliciete differentieschema van J.J.Dronkers waarna ZWENDL een berekening kan gaan uitvoeren.

II.2 Randvoorwaarden ZWENDL

De randen van het NDB-model liggen bovenstrooms bij Lith, Tiel en Hagestein en benedenstrooms bij Hoek van Holland en het Zeegat van Goeree. De bovenstroomse randvoorwaarden zijn gemiddelde debieten bij een Rijnafvoer van 2200 m³/s bij Lobith en een 50% optredende waarde van de Maasafvoer. Deze debieten zijn in de Maas (Lith) 320 m³/s, in de Waal (Tiel) 1485 m³/s en in de Lek (Hagestein) 395 m³/s.

De benedenstroomse randvoorwaarden zijn waterstanden hiervoor heb ik het slotgemiddelde getij van 1991 bij Hoek van Holland en bij het Zeegat van Goeree gekozen (zie onderstaande figuur).



Randvoorwaarden ZWENDL

Bijlage III WAQUA

III.1 Achtergrond WAQUA

III.1.1 Fysische achtergrond WAQUA

Het programmapakket WAQUA is gebaseerd op de tweedimensionale ondiepwater-vergelijkingen: er is geïntegreerd over de diepte.

De vergelijking voor het behoud van massa (continuïteitsvergelijking) luidt:

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{\delta Q_x}{\delta x} + \frac{\delta Q_y}{\delta y} = 0$$

De vergelijking van de waterbeweging in de x-richting luidt:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta Q_x}{\delta t} + \frac{\delta(Q_x Q_x / D)}{\delta x} + \frac{\delta(Q_y Q_x / D)}{\delta y} \\ & - \frac{\delta}{\delta x} \left(D \epsilon \frac{\delta(Q_x / D)}{\delta x} \right) - \frac{\delta}{\delta y} \left(D \epsilon \frac{\delta(Q_x / D)}{\delta y} \right) \\ & + g D \frac{\delta(H+P)}{\delta x} + Fr |Q| Q_x / D^2 - C_0 Q_y - W_x = 0 \end{aligned}$$

waarin

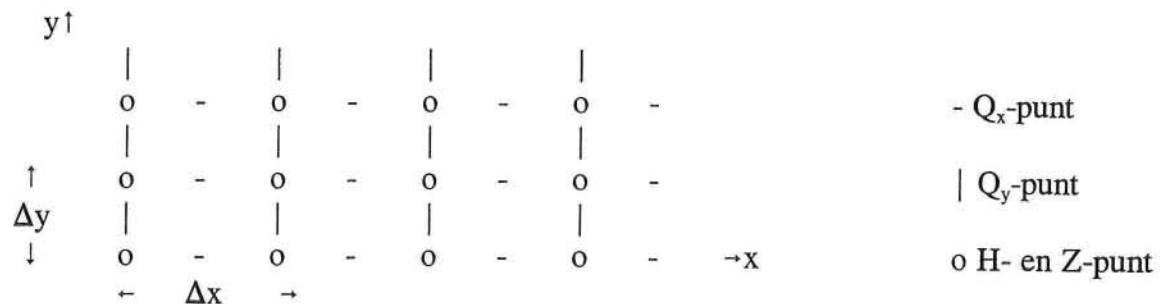
g	= zwaartekrachtsversnelling
H	= waterniveau
Z	= bodemniveau
D	= waterdiepte
Q _x	= x-component van de diepte geïntegreerde snelheid
Q _y	= y-component van de diepte geïntegreerde snelheid
ε	= turbulente viscositeit
P	= luchtdruk
Fr	= wrijvingscoëfficiënt
C ₀	= Coriolis-coëfficiënt
W _x	= windschuifspanning

De bewegingsvergelijking in de y-richting is analoog, met uitzondering van de Coriolis-coëfficiënt, die is in dat geval C₀*Q_x. De discretisatie van deze vergelijkingen leidt tot een rekenschema, dat de volgende eigenschappen bezit:

- toepassing van Alternating Direction Implicit Method (ADI)
- berekening van stromingvector en waterniveau op verspringende punten.

III.1.2 Numerieke achtergrond WAQUA

WAQUA maakt gebruik van de Alternating Direction Implicit (ADI) methode. De stromings(snelheids)vector en het waterniveau worden op t.o.v. verspringende punten berekend. Het gebruikte grid ziet er als volgt uit:



Q_x en Q_y zijn over de diepte geïntegreerde snelheden in de x- resp. y-richting. H is het waterniveau, Z is het niveau van de bodem. De diepte D is dus gelijk aan H-Z en de snelheid volgt uit: $u = Q_x/D$ en $v = Q_y/D$. De plaats in het grid wordt aangegeven met twee indices nl. i en j.

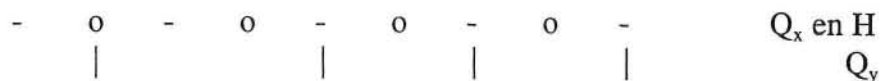
$H_{i,j}$ is H in het punt (x, y)

$Q_{x\ i,j}$ is Q_x in het punt $(x + \Delta x/2, y)$

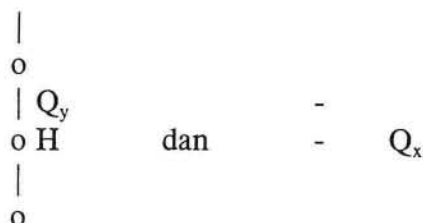
$Q_{y\ i,j}$ is Q_y in het punt $(x, y + \Delta y/2)$

Het punt (i, j) in het grid valt samen met een H, Z punt. Dit is een staggered grid. Gedurende de berekening worden op iedere halve tijdstap de nieuwe waarden voor Q_x , Q_y en H berekend. In de eerste halve tijdstap vindt een berekening plaats in de x-richting, in de tweede halve tijdstap in de y-richting. De te berekenen waarden in deze beide richtingen worden op een impliciete manier berekend. Bij de berekening in de x-richting worden de afgeleiden naar x impliciet behandeld en de afgeleiden naar y expliciet, en vice versa.

In de eerste halve tijdstap:



In de tweede halve tijdstap:



De waterniveau's worden berekend met de continuïteitsvergelijking voor het water, de snelheden met de bewegingsvergelijking voor het water. Beide p.d.v.'s worden benaderd met een numeriek schema dat centraal is in de ruimte en ongeveer centraal in de tijd. Theoretisch gezien is het schema onvoorwaardelijk stabiel.

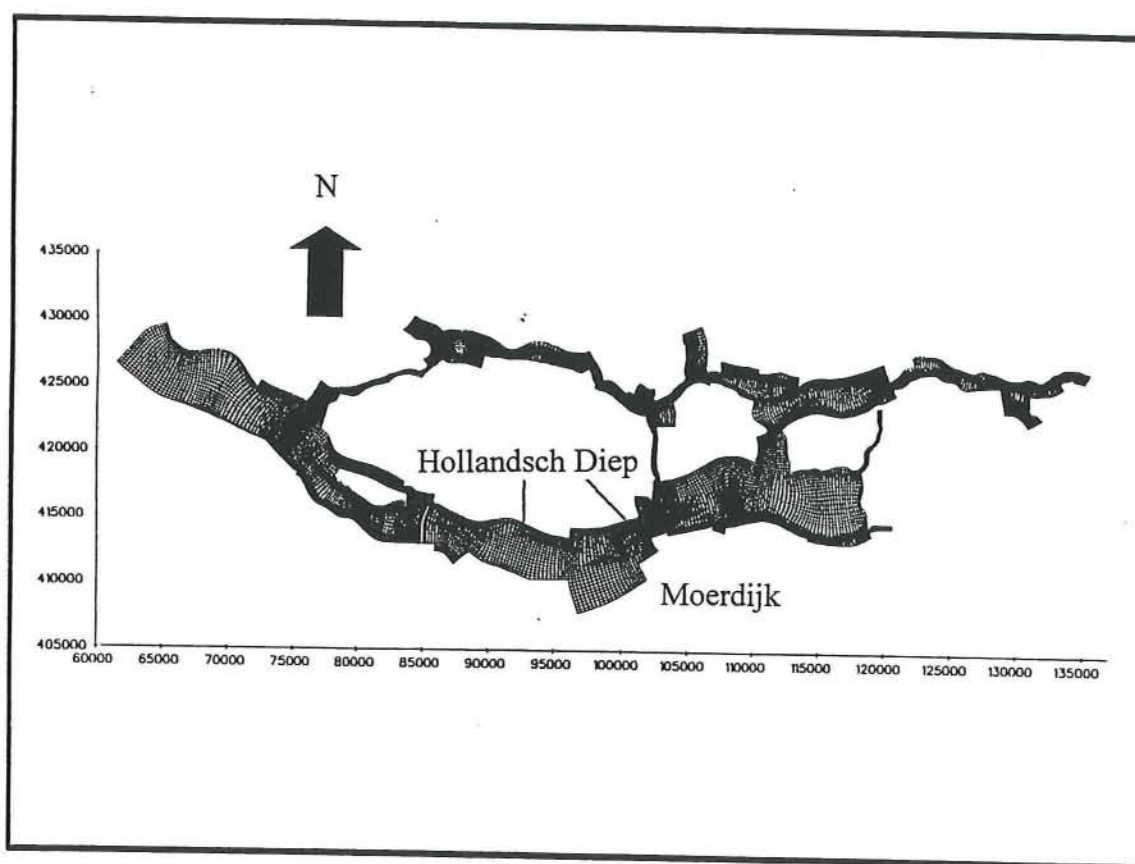
literatuur:

-Collard, E.A., RIZA vestiging Dordrecht en ingenieursbureau Svasek BV, *Een rechtlijnig WAQUA-model van het Haringvliet-Hollandsch Diep: Modelbouw, afregeling, en verificatie*, december 1991

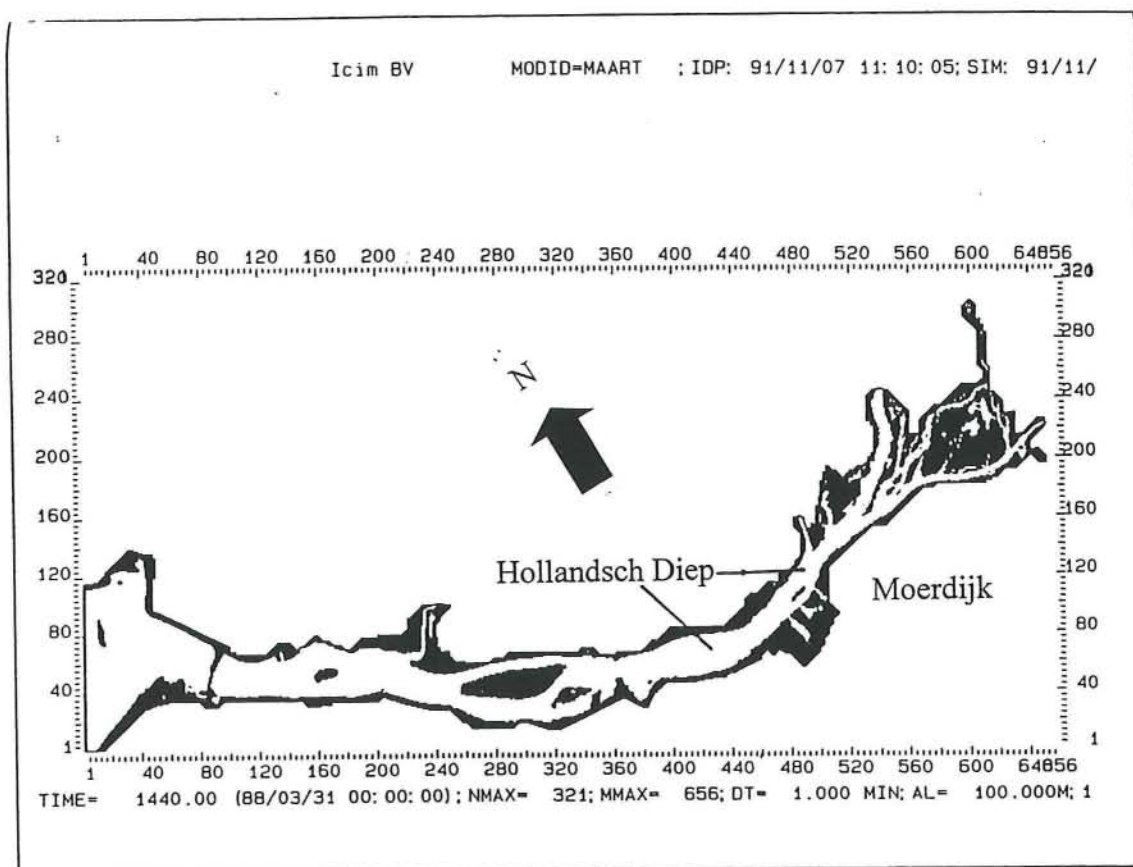
-ICIM, Informatica Centrum voor Infrastructuur en Milieu, *WAQUA-unix version, Users Guide I en II*, 1991/1992

III.2 Rechthoekige en kromlijnige modellering WAQUA

Zoals al in hoofdstuk 4 is vermeld is er ook een tweedimensionaal horizontaal model van de zuidrand van het Noordelijk Deltabekken beschikbaar. Dit model kan voor de waterbeweging (waterstanden, debieten, snelheden en concentraties) doorgerekend worden met het programma WAQUA. In 1991 zijn een kromlijnige modellering en een rechthoekige modellering van het gebied gereedgekomen (zie figuur III.1 en III.2). Het rechthoekige model omvat de Voordelta, het Haringvliet, het Hollandsch Diep, de Dordtsche Kil, de Amer, de Biesbosch en de Nieuwe Merwede. Het kromlijnige model omvat niet de Voordelta maar wel de Oude Maas, Spui, Noord, Beneden, Nieuwe en Boven Merwede.



figuur III.1 Kromlijnige modellering WAQUA



figuur III.2 Rechtlijnige modellering WAQUA (uit Collard, 1991)

III.3 Randvoorwaarden WAQUA

Voor mijn berekeningen met WAQUA heb de volgende uitvoer van ZWENDL gebruikt:

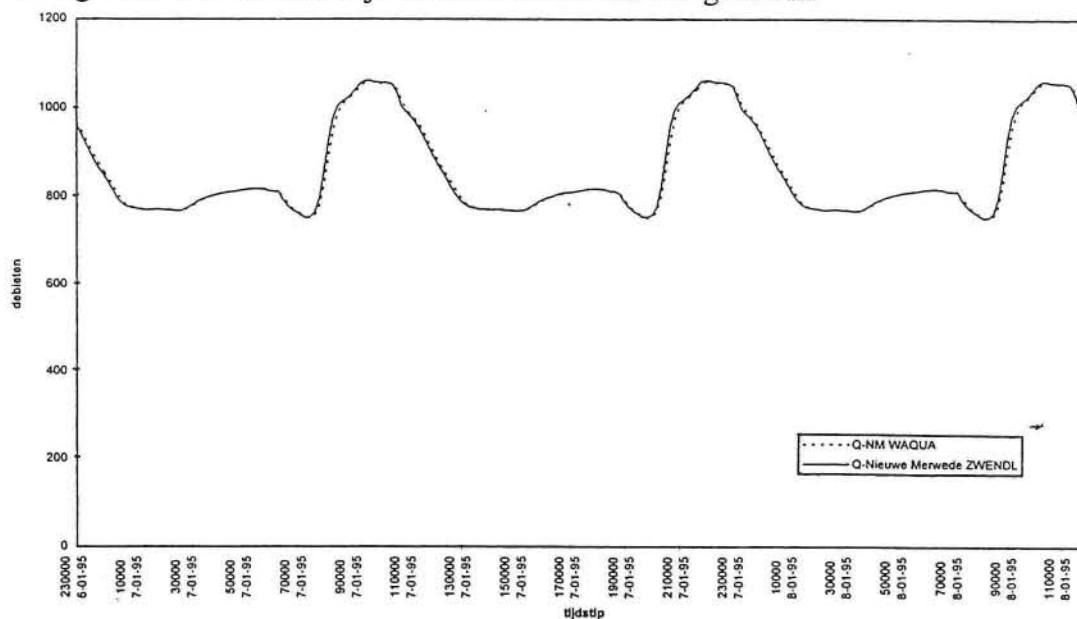
-de debieten door de Nieuwe Merwede bij Kop van 't Land (ZWENDL-punt 102.2)

-de debieten door de Bergsche Maas bij Keizersveer (ZWENDL-punt 77.2)

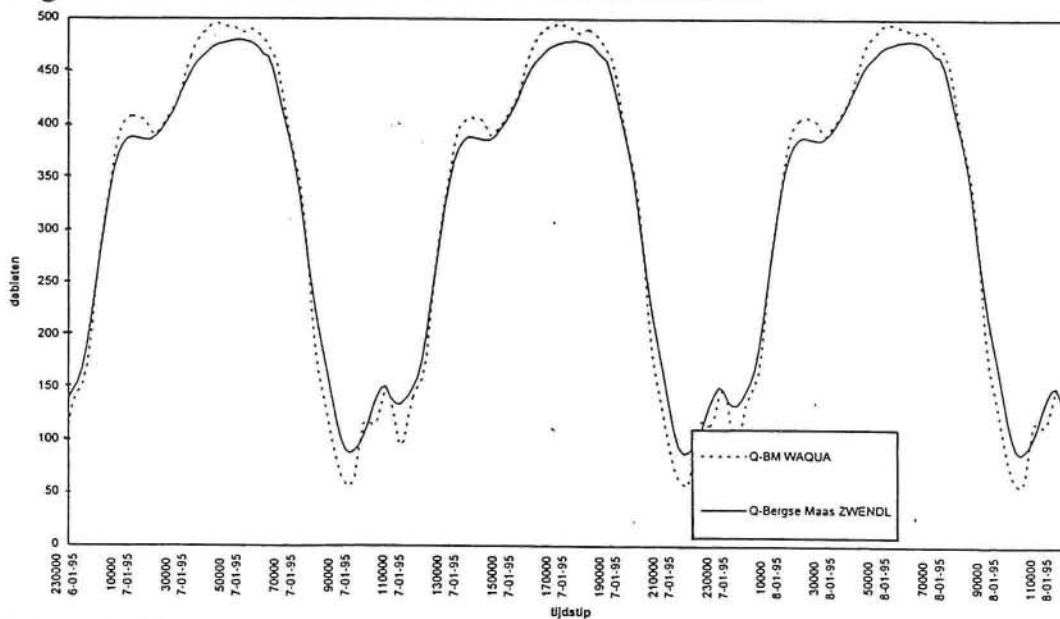
-de debieten door de Dordtsche Kil (ZWENDL-punt 99.2)

-de waterstanden bij de Haringvlietbrug (ZWENDL-punt 70.2)

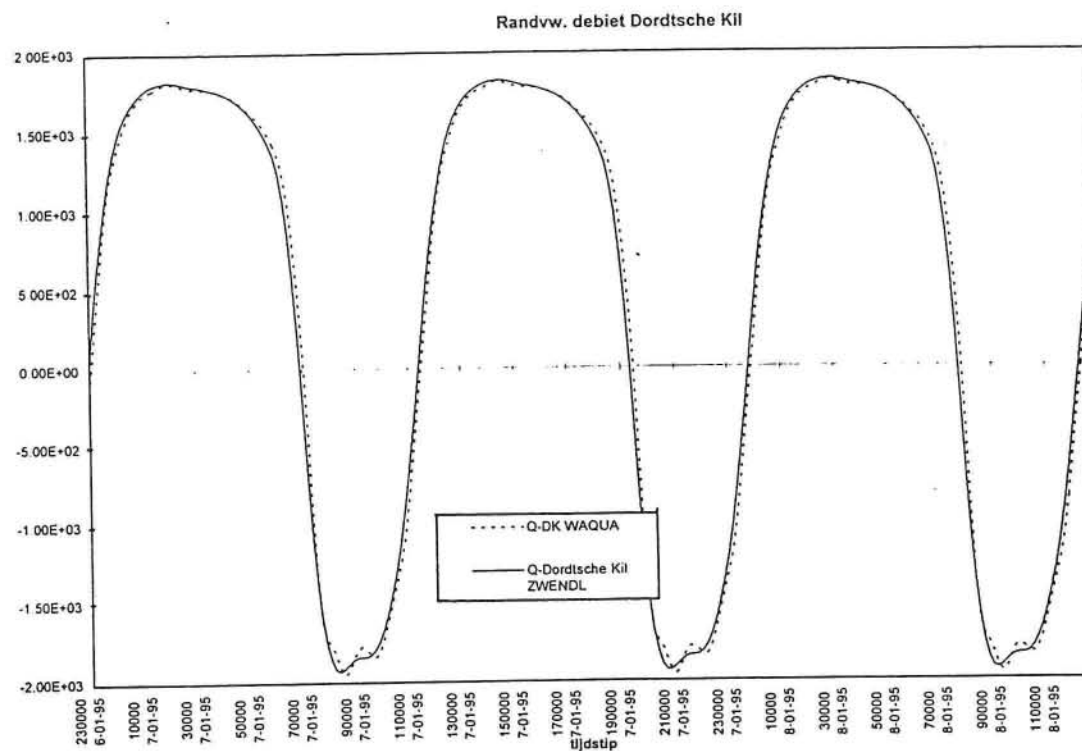
In figuren III.3 tm III.6 zijn deze randvoorwaarden getekend



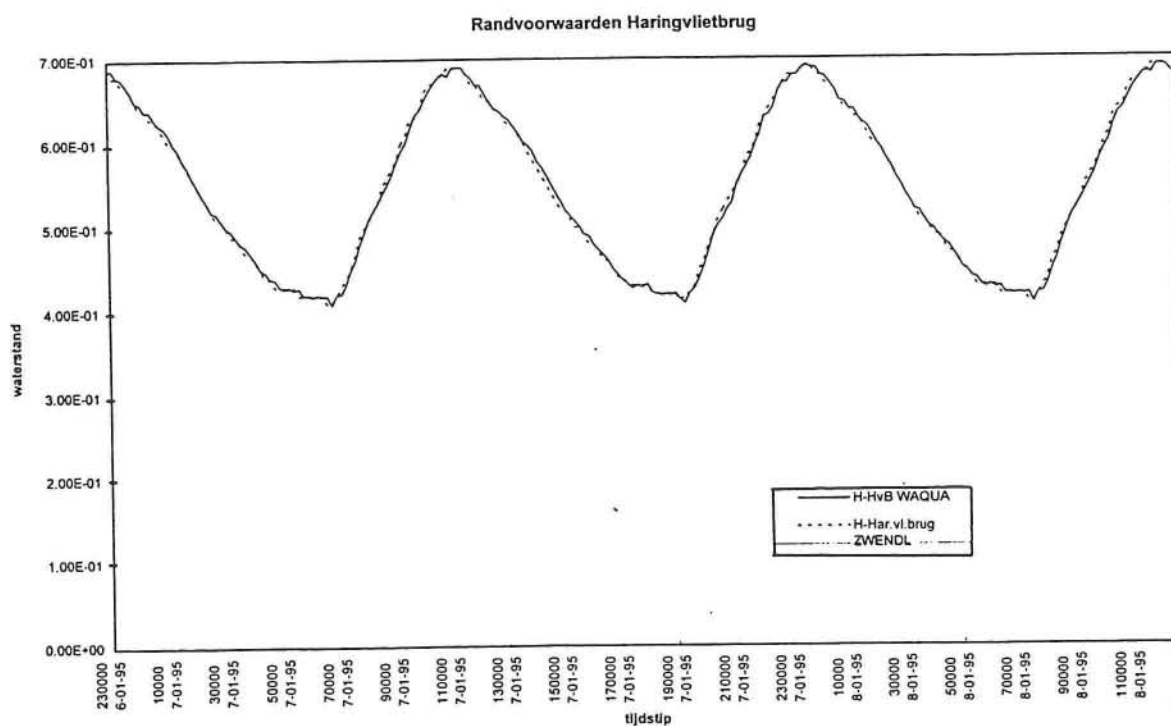
Figuur III.3 Randvoorwaarde debieten Nieuwe Merwede



Figuur III.4 Randvoorwaarde debieten Amer



Figuur III.5 Randvoorwaarde debieten Dordtsche Kil



Figuur III.6 Randvoorwaarde waterstanden Haringvlietbruggen

Bijlage IV Toetsing baggerspecie voor stortlocaties

Om de vervuiling van sediment te classificeren is een onderverdeling in klassen voorgeschreven. Voor elke vervuilende stof zijn de grenswaarden van de concentratie voor elke klasse bij de wet bepaald. Dit kan betekenen dat een bepaalde hoeveelheid sediment klasse 3 voor de ene stof is en klasse 2 voor een andere stof.

Zowel zand als slib worden in 5 klassen onderverdeeld:

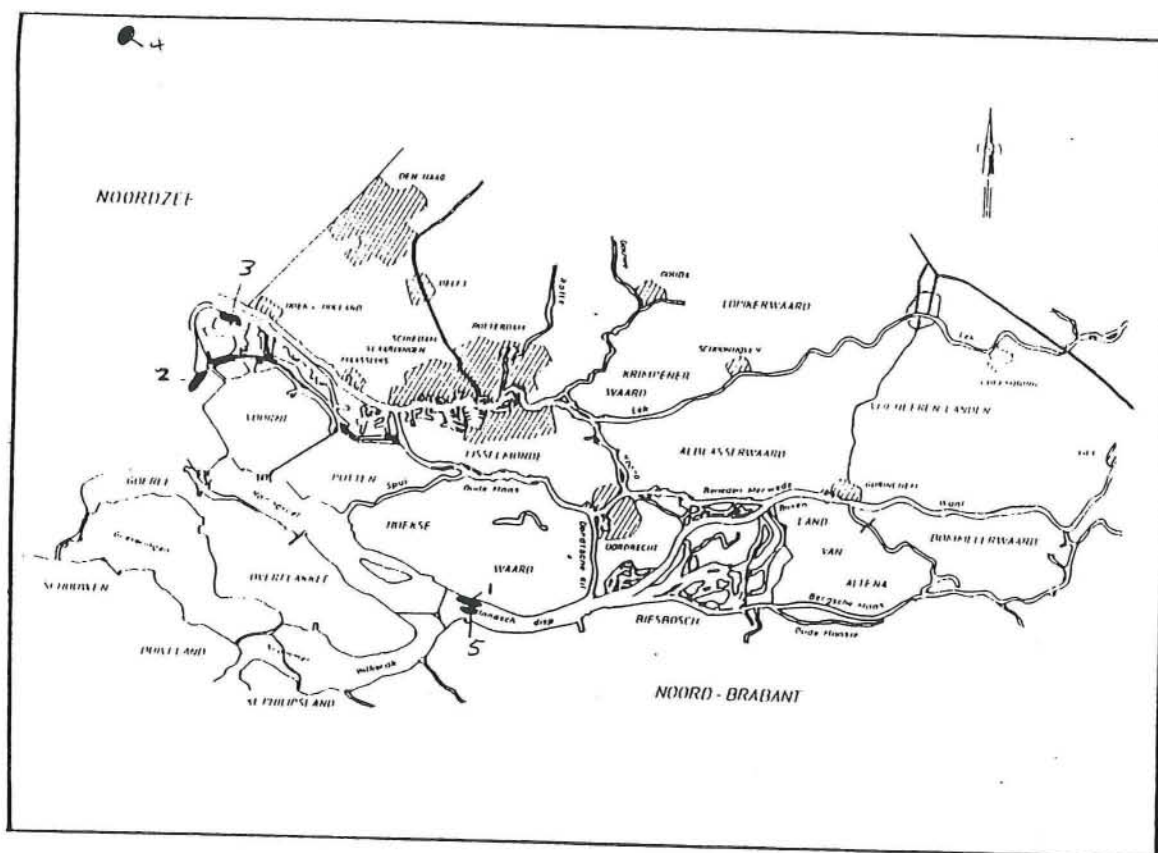
- klasse 0: sediment dat een natuurlijke vervuiling heeft
- klasse 1: licht vervuild sediment
- klasse 2: middelmatig vervuild sediment
- klasse 3: middelmatig tot zwaar vervuild sediment
- klasse 4: zwaar vervuild sediment

Momenteel zijn er drie stortlocaties in gebruik voor het bergen van vervuild slib. Dit is de locatie Cromstrijen voor gebiedseigen slib, de Grootschalige Locatie (Slufter) voor overig gemiddeld vervuild slib en de Papegaaiebek waar het zwaarvervuild slib gestort wordt (zie figuur IV.1).

-Klassen 0 en 1 mogen op de Noordzee (Loswal Noord) gestort worden of verwerkt worden in grondwerken.

-Klassen 2 en 3 moeten in slibdepots zoals de slufter (tot klasse 3) en Cromstrijen (gebiedseigen slib tot klasse 3) gestort worden

-Klasse 4 moet in de Papegaaiebek gestort worden. Dit is een waterdicht bassin.



figuur IV.1 Kaart NDB met stortlocaties

1. Depot Cromstrijen
2. Depot Slufter
3. Depot Papegaaiebek
4. Depot Loswal Noord
5. Nieuwe depot Cromstrijen

Bij de toetsing van bodemonmonsters wordt op een aantal parameters (stoffen) gelet. De parameters kunnen in de volgende groepen ingedeeld worden:

- zware metalen : kwik, cadmium, koper, nikkel, lood, zink, chroom, arseen
- PAK's = Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen : verbrandingsprodukten van auto's/industrie enz.
- PCB's = Polychloorbifenylen : giftige stoffen afkomstig uit de industrie
- OCB's = Organo Chloor Bestrijdingsmiddelen : giftige stoffen vanuit landbouw/industrie
- oliën

De hierboven genoemde parameters bestaan uit de volgende stoffen:

Metalen	Arseen
	Cadmium
	Chroom
	Koper
	Kwik
	Lood
	Nikkel
	Zink
Olie	Olie-RIZA
	Olie-TNO
EOX/EOCI	EOCI
PCB's	PCB-28
	PCB-52
	PCB-101
	PCB-118

	PCB-138
	PCB-153
	PCB-180
OCB's/gehalogeneerde koolwaterstoffen	Alfa HCH
	Bèta HCH
	Gamma HCH
	Heptachloor
	Heptachloorepoxide
	Aldrin
	Dieldrin
	Endrin
	Isodrin
	Telodrin
	ppDDD
	ppDDE
	ppDDT
	Hexachloorbenzeen
	Hexachloorbutadieen
	Alfa Endosulfan
PAK's	Fluorantheen
	Benzo(b)fluorantheen
	Benzo(k)fluorantheen
	Benzo(a)pyreen
	Benzo(ghi)peryleen
	Indeno(1,2,3,cd)pyreen

Tabel IV.1

Al deze stoffen kunnen zich aan slibdeeltjes binden. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter het specifiek oppervlak. Dit is het oppervlak per gram stof (bij slib in orde 30 m²/g). Er zullen zich dus vooral aan kleine deeltjes veel verontreinigingen hechten.

Aan zand, of liever gezegd tussen de zanddeeltjes aan kleine slibdeeltjes, komen veel meer PAK's en oliën voor dan andere stoffen.

IV.1 Toetsing Grootschalig Locatie - Papegaaiebek

Algemeen

Deze toetsing is in 1987 ontwikkeld door een werkgroep waarin vertegenwoordigd waren VROM, Rijkswaterstaat, Gemeentewerken Rotterdam en Provincie Zuid-Holland. De toetsing heeft als doel aan te geven of specie geborgen kan worden in de Grootschalige Locatie (Slufter) of dat de specie ernstig verontreinigd is en geborgen dient te worden in de Papegaaiebek.

Er vindt een correctie van de gemeten gehalten plaats.

De toetsing ziet er als volgt uit:

Voor de parameters Arseen, Olie, Benzo(b)fluorantheen, Benzo(a)pyreen en de 6 PAK's van Borneff geldt een absolute grens. Bij overschrijding van deze kwaliteitsgrens dient specie gestort te worden in de Papegaaiebek.

Voor PCB's en de Organo Chloor-bestrijdingsmiddelen geldt dat een individuele parameter de kwaliteitsgrens met een factor 2 mag overschrijden, mits de som van de gehalten in de desbetreffende groep een bepaalde grenswaarde niet overschrijdt.

Voor EOCl wordt de kwaliteitsgrens als signaleringswaarde gehanteerd. Indien de signaleringswaarde wordt overschreden dient een nader onderzoek uitgevoerd te worden naar de oorzaak van het hoge EOCl-gehalte.

Op andere metalen dan Arseen wordt niet getoetst.

Correctie van gemeten gehalten

Bij de toetsing worden de gemeten gehalten gecorrigeerd. De correctie van het gemeten gehalte aan arseen geschiedt als volgt:

$$\text{gecorrigeerd gehalte} = \text{gemeten gehalte} * \frac{29}{15 + 0,4 * (L + O)}$$

waarbij

L = % < 2 µm t.o.v. drooggewicht

O = % organische stof t.o.v. drooggewicht

Voor de overige parameters wordt het gemeten gehalte als volgt gecorrigeerd:

$$\text{gecorrigeerd gehalte} = \frac{10}{O} * \text{gemeten gehalte}$$

waarbij

O = % organische stof t.o.v. drooggewicht met een ondergrens van 2%

Grenswaarden

De gecorrigeerde gehalten worden getoetst aan de volgende, in tabel IV.2 weergegeven waarden.

Tabel IV.2 Overzicht grenswaarden

Groep	Parameter	Grenswaarde
Metalen	Arseen	50 mg/kg
Olie	Olie-RIZA	6667 mg/kg
	Olie-TNO	5000 mg/kg
EOX/EOCl	EOCl	20 mg/kg
PCB's	PCB-28	1000 µg/kg
	PCB-52	1000 µg/kg
	PCB-101	1000 µg/kg
	PCB-118	1000 µg/kg
	PCB-138	1000 µg/kg
	PCB-153	1000 µg/kg
	PCB-180	1000 µg/kg
totaal PCB's		aant.param.*500 µg/kg
OCB's/gehalogeneerde koolwaterstoffen	Alfa HCH	1000 µg/kg
	Bèta HCH	1000 µg/kg
	Gamma HCH	1000 µg/kg
	Heptachloor	1000 µg/kg

	Heptachloorepoxide	1000 µg/kg
	Aldrin	1000 µg/kg
	Dieldrin	1000 µg/kg
	Endrin	1000 µg/kg
	Isodrin	1000 µg/kg
	Telodrin	1000 µg/kg
	ppDDD	1000 µg/kg
	ppDDE	1000 µg/kg
	ppDDT	1000 µg/kg
	Hexachloorbenzeen	1000 µg/kg
	Hexachloorbutadien	1000 µg/kg
totaal OCB's		aant.param.*500 µg/kg
PAK's	Fluorantheen	n.v.t.
	Benzo(b)fluorantheen	2,5 mg/kg
	Benzo(k)fluorantheen	n.v.t.
	Benzo(a)pyreen	2,5 mg/kg
	Benzo(ghi)peryleen	n.v.t.
	Indeno(1,2,3,cd)pyreen	n.v.t.

Opmerking: voor de gehalogeneerde koolwaterstoffen is de echte kwaliteitgrens 500 µg/kg ds. In deze tabel is de voor deze (individuele) parameters geldende grenswaarde van 2*kwaliteitgrens opgenomen. Bij de sommatie wordt uitgegaan van 500 µg/kg ds per parameter.

Indien één of meerdere grenswaarden overschreden worden, moet de specie in de Papegaaiebek gestort worden. De parameter EOCl wordt hierbij niet meegenomen. Indien de grenswaarde voor deze parameter wordt overschreden, dient nader onderzoek van het hoge EOCl-gehalte uitgevoerd te worden.

IV.2 Toetsing Cromstrijen

Deze toetsing is ontwikkeld in 1992. Op de locatie Cromstrijen wordt zand gewonnen voor grondwerken en in de kuil die daardoor ontstaat kan dan baggerspecie gestort worden. De stortlokatie Cromstrijen is een open stortlokatie, d.w.z. dat de zandwin- en stortlokatie niet afgeschermd worden door damwanden of taluds.

Dit open karakter heeft ook gevolgen voor de criteria die aan de te storten baggerspecie worden gesteld. De specie mag namelijk niet zwaarder verontreinigd zijn dan het bodemmateriaal dat er van nature al ligt. Om dit te kunnen toetsen zijn "lokale signaleringswaarden" opgesteld. Deze "lokale signaleringswaarden" zijn de afgeleid van metingen van gebiedseigen bodemmateriaal van een monstercampagne uit 1985-86. Alle gemeten gehalten van verontreinigingen heeft men gecorrigeerd naar een standaardbodem (fractie $< 16 \mu\text{m} = 50$ gewichtsporc.). De "lokale signaleringswaarden" zijn de waarden van verontreinigingen die door 95% van alle gecorrigeerde gehalten onderschreden worden.

In die gevallen waarbij de "lokale signaleringswaarden" hoger lager dan de 3/4-grenzen van het Identificatiesysteem Baggerspecie Benedenrivieren gebied (IBB), zijn deze 3/4-grenzen overgenomen als extra waarborg.

Correctie

Om monsters te corrigeren naar de standaardbodem (50% gewicht $< 16 \mu\text{m}$) zodat toetsing aan de "lokale signaleringswaarden" mogelijk is, wordt voor zware metalen en PAK's formule 1 gehanteerd en voor OCB's en PCB's formule 2:

$$\text{Formule 1} \quad F(x_{50}) = \left(\frac{x_{50}}{x_i}\right)^m * Y_i \quad \text{met } x_i > 1$$

waarbij :

$F(x_{50})$ = gecorrigeerd verontreinigingsgehalte

x_{50} = percentage $< 16 \mu\text{m}$ waarbij het gehalte aan verontreiniging bekend moet worden.

x_i = gemeten percentage $< 16 \mu\text{m}$

y_i = gemeten verontreinigingsgehalte van het monster

m = gegeven macht uit tabel IV.3

Groep	Variabele	waarde m
Metalen	Arseen	0,46
	Cadmium	0,63
	Chroom	0,70
	Koper	0,61
	Kwik	0,62
	Lood	0,68
	Nikkel	0,62
	Zink	0,64
Olie		0,97
EOX/EOCl	EOCl	0,48
PAK's	Fluorantheen	0,74
	Benzo(b)fluorantheen	0,79
	Benzo(k)fluorantheen	0,80
	Benzo(a)pyreen	0,72
	Benzo(ghi)peryleen	0,78
	Indeno(1,2,3,cd)pyreen	0,77
Borneff (totaal PAK's)		0,77

Tabel IV.3

Voor OCB's en PCB's geldt:

Formule 2

$$F(x_{50}) = (e^{m(x_{50} - x_i)}) * Y_i \quad \text{met } x_i > 1$$

waarbij :

 $F(x_{50})$ = gecorrigeerd verontreinigingsgehalte x_{50} = percentage < 16 μm waarbij het gehalte aan verontreiniging bekend moet worden. x_i = gemeten percentage < 16 μm y_i = gemeten verontreinigingsgehalte van het monster m = gegeven macht uit tabel IV.4

Groep	Variabele	waarde m
PCB's	PCB-28	0,039
	PCB-52	0,037
	PCB-101	0,049
	PCB-138	0,051
	PCB-153	0,048
	PCB-180	0,040
OCB's/gehalogeneerde koolwaterstoffen	τ - HCH	0,067
	Hexachloorbenzeen	0,066
	Heptachloor	0,033
	Heptachloorepoxide	0,032
	DDD	0,032
	DDE	0,036
	Alfa Endosulfan	0,027

Tabel IV.4

De machten uit tabel IV.3 en tabel IV.4 zijn berekend uit de gemeten gehalten aan verontreinigingen in oppervlaktemonsters van de waterbodem in het Hollandsch Diep en Haringvliet.

Toetsing

De via bemonstering en analyse verkregen (gemeten) gehalten aan verontreinigingen in het te baggeren waterbodemsediment, worden aan de hand van de formules 1 en 2 gecorrigeerd naar $50\% < 16 \mu\text{m}$. Vervolgens worden de gecorrigeerde waarden getoetst aan de lokale signaleringswaarden.

Gebiedseigen baggerspecie kan in depot Cromstrijen worden gestort, indien voor geen enkele parameter de lokale signaleringswaarde wordt overschreden.

Groep	Variabele	lokale signaleringswaarde
Metalen	Arseen	50 mg/kg
	Cadmium	25 mg/kg
	Chroom	360 mg/kg
	Koper	220 mg/kg
	Kwik	5 mg/kg
	Lood	340 mg/kg
	Nikkel	80 mg/kg
	Zink	2330 mg/kg
Olie	Olie	4700 mg/kg
EOX/EOCl	EOCl	21 mg/kg
PCB's	PCB-28	150 $\mu\text{g/kg}$
	PCB-52	120 $\mu\text{g/kg}$
	PCB-101	190 $\mu\text{g/kg}$
	PCB-138	250 $\mu\text{g/kg}$
	PCB-153	300 $\mu\text{g/kg}$
	PCB-180	125 $\mu\text{g/kg}$
OCB's/gehalogeneerde koolwaterstoffen	τ - HCH	25 $\mu\text{g/kg}$
	Heptachloor	205 $\mu\text{g/kg}$
	Heptachloorepoxide	100 $\mu\text{g/kg}$
	DDD	130 $\mu\text{g/kg}$

	DDE	115 µg/kg
	Hexachloorbenzeen	180 µg/kg
	Alfa Endosulfan	55 µg/kg
Groep	Variabele	lokale signaleringswaarde
PAK's	Fluorantheen	6,5 mg/kg
	Benzo(b)fluorantheen	3,0 mg/kg
	Benzo(k)fluorantheen	1,7 mg/kg
	Benzo(a)pyreen	2,0 mg/kg
	Benzo(ghi)peryleen	3,1 mg/kg
	Indeno(1,2,3,cd)pyreen	2,7 mg/kg
Borneff (totaal PAK's)		19,0 mg/kg

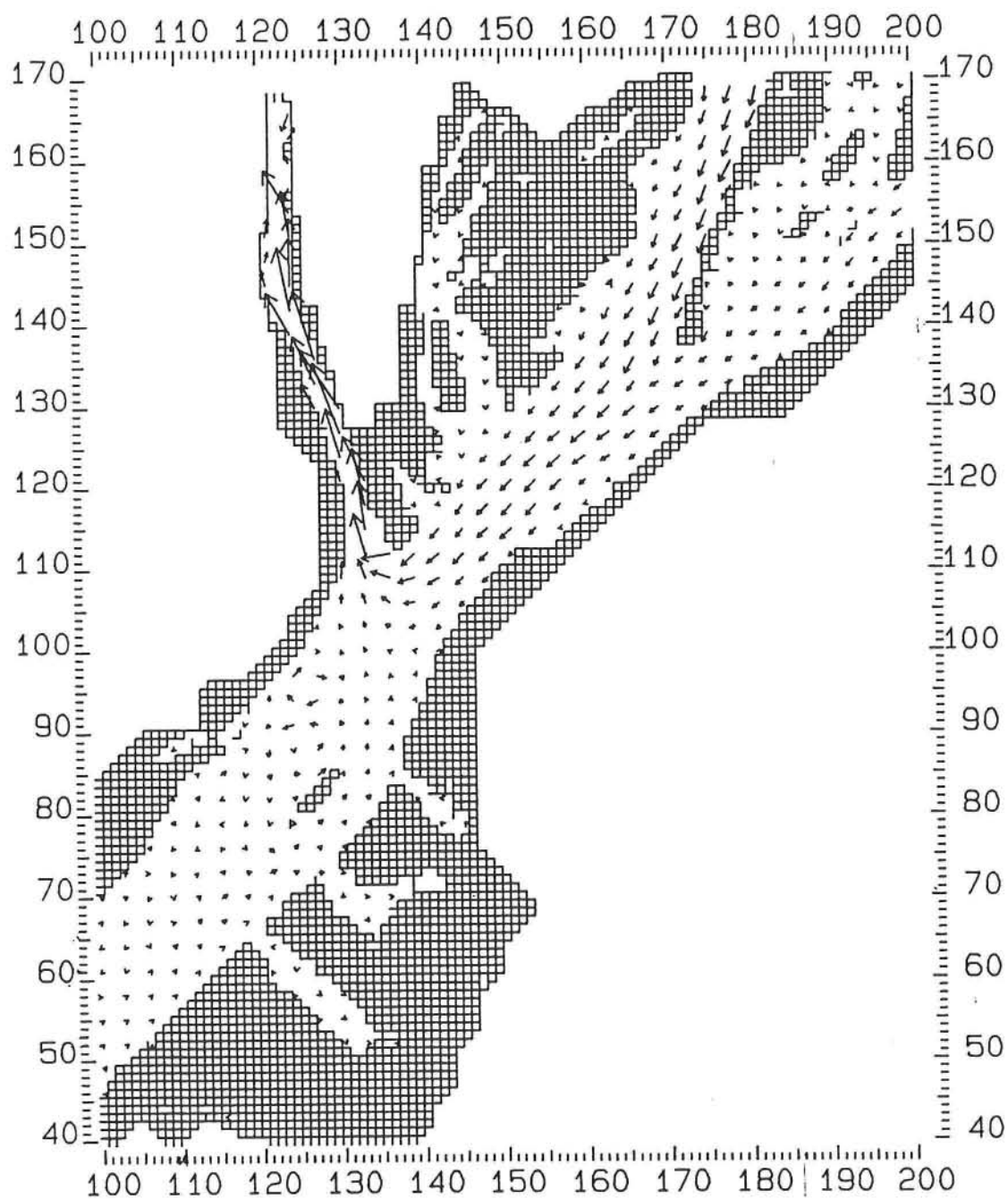
Tabel IV.5

IV.3 Licht vervuild sediment.

Licht vervuild sediment (klasse 0 en 1) wordt vooral in Rotterdam opgebaggerd. Dit sediment komt dan ook niet vanuit de grote rivieren maar wordt vanuit zee met de vloedstroom en bij storm aangevoerd. Dit sediment hoeft niet in speciaal daarvoor aangelegde stortlokaties geborgen te worden maar kan in grondwerken gebruikt worden of weer op zee gestort worden in de stortlokatie "Loswal Noord"

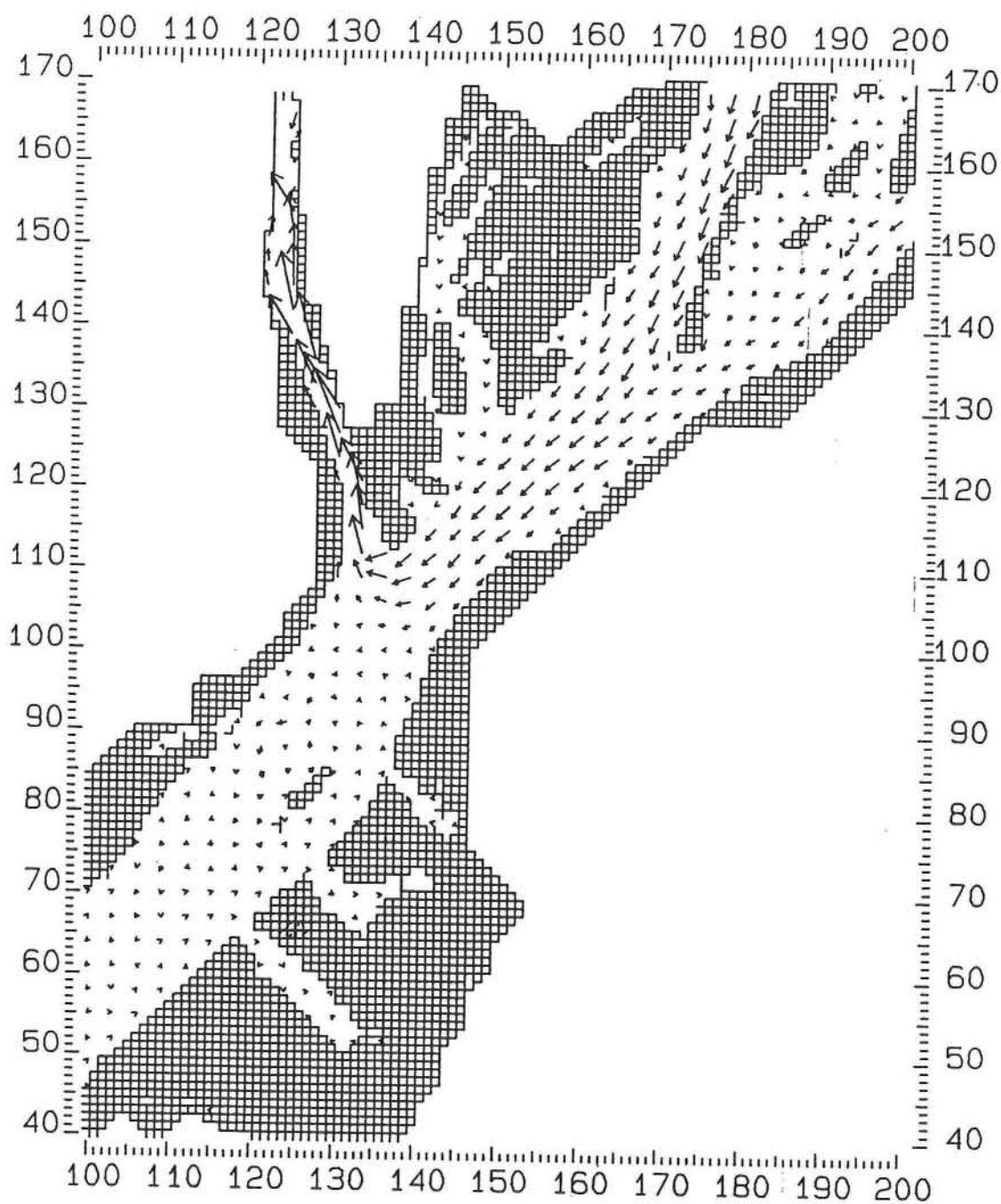
IV.4 Nieuwe stortlokaties

Omdat de bestaande stortlokaties redelijk gevuld beginnen te raken zullen in de toekomst nieuwe locaties aangelegd worden waar het slib in de toekomst gestort kan worden. De locatie die het meest vergoederd is, is die op het Hollandsch Diep. Deze nieuwe stortlokatie komt naast de bestaande locatie Cromstrijen te liggen. Deze stortlokatie zal een afgeschermd bekken worden waarbij het te winnen bodemmateriaal voor een groot deel gebruikt worden om de taluds rond het bekken te maken. Door een waterdichte folie in de taluds en op de bodem neer te leggen wordt doorlekken voorkomen. Daardoor kan in het bekken het zwaarst vervuilde slib geborgen worden.

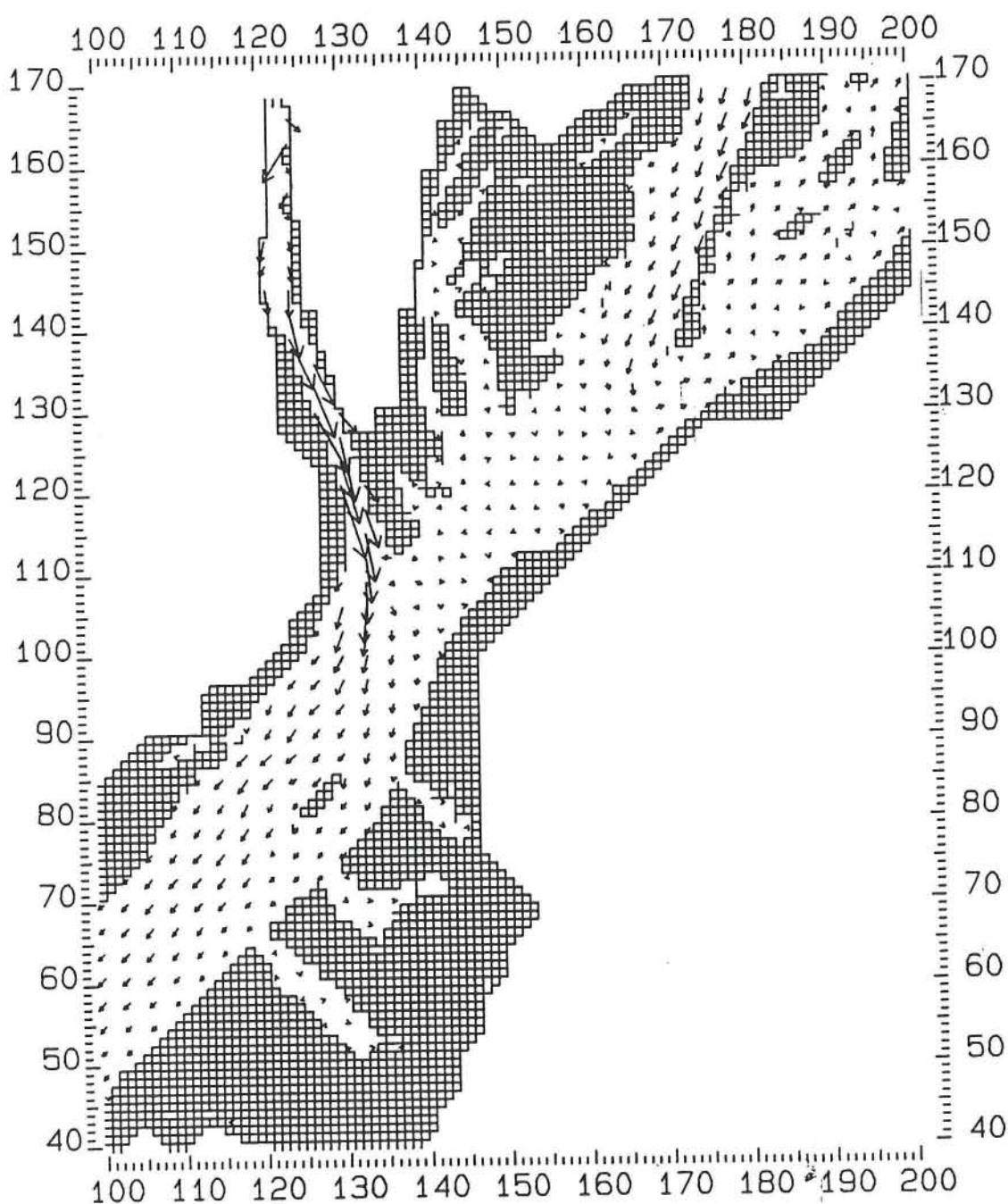
Bijlage V Resultaten Rijnafvoer 2200 m³/s**V.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 2200 m³/s, figuur 1**

Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

V.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 2200 m³/s, figuur 2

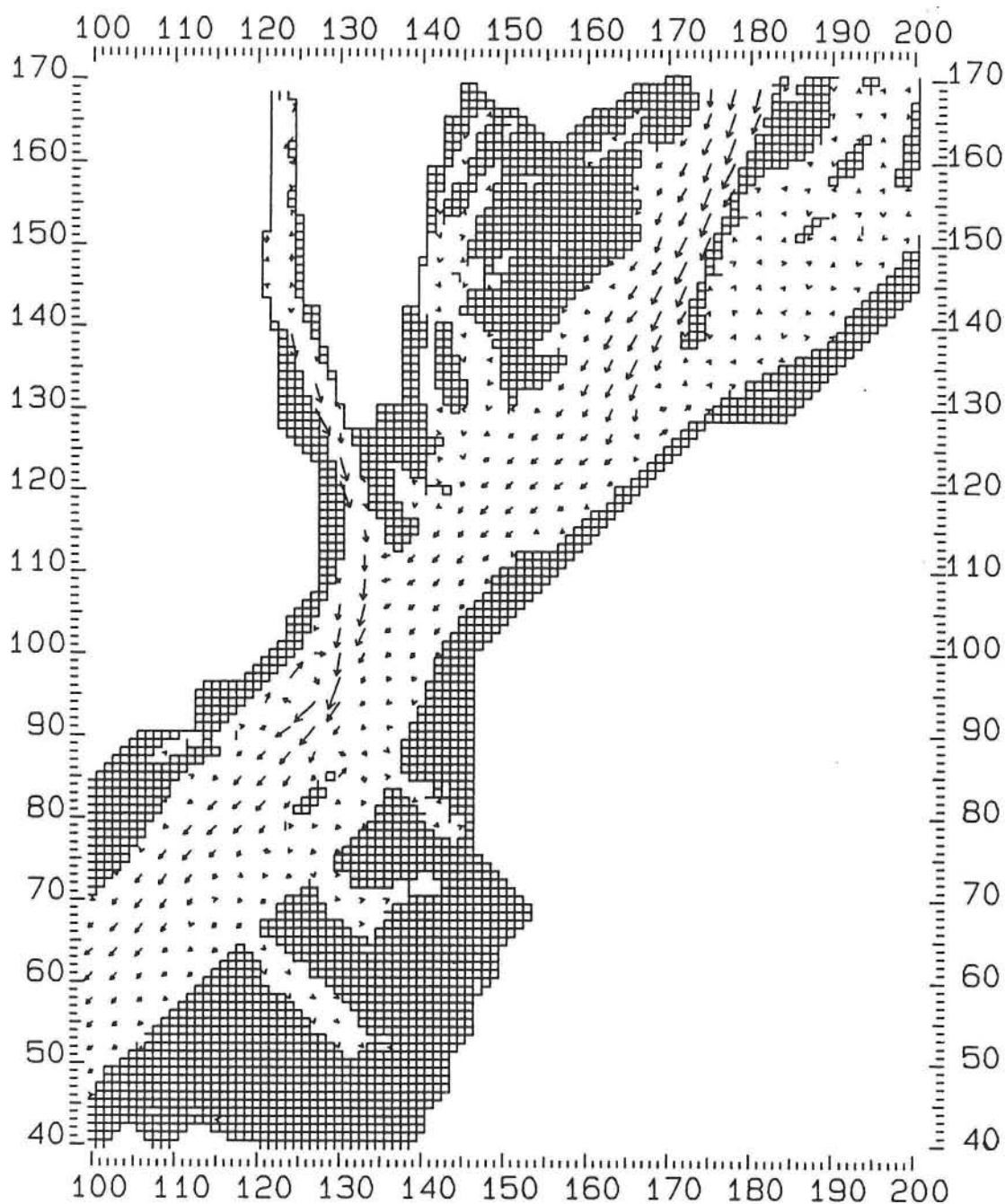


Figuur 2 Tijdens eb

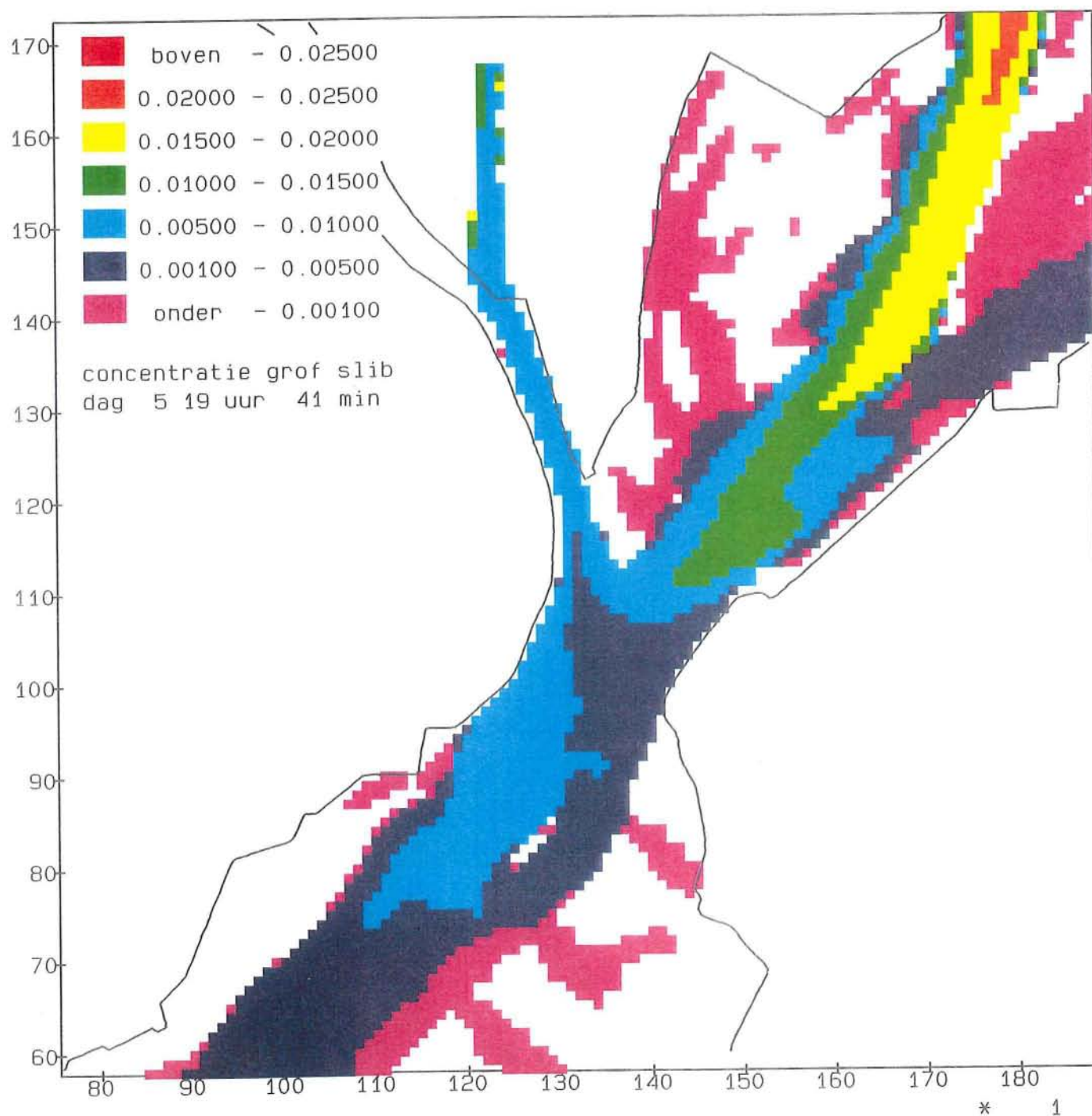
V.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 2200 m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

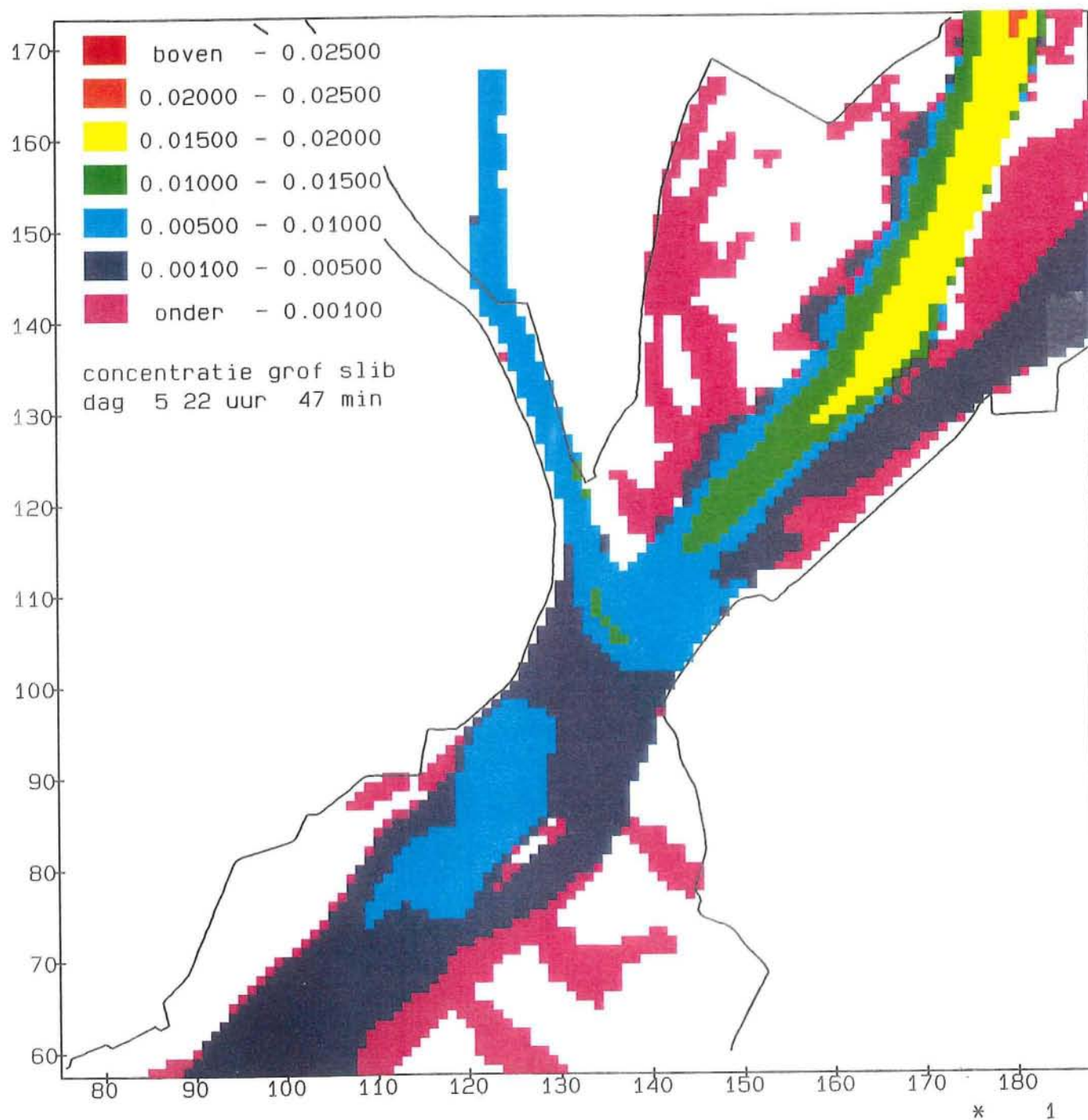
V.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 2200 m³/s, figuur 4



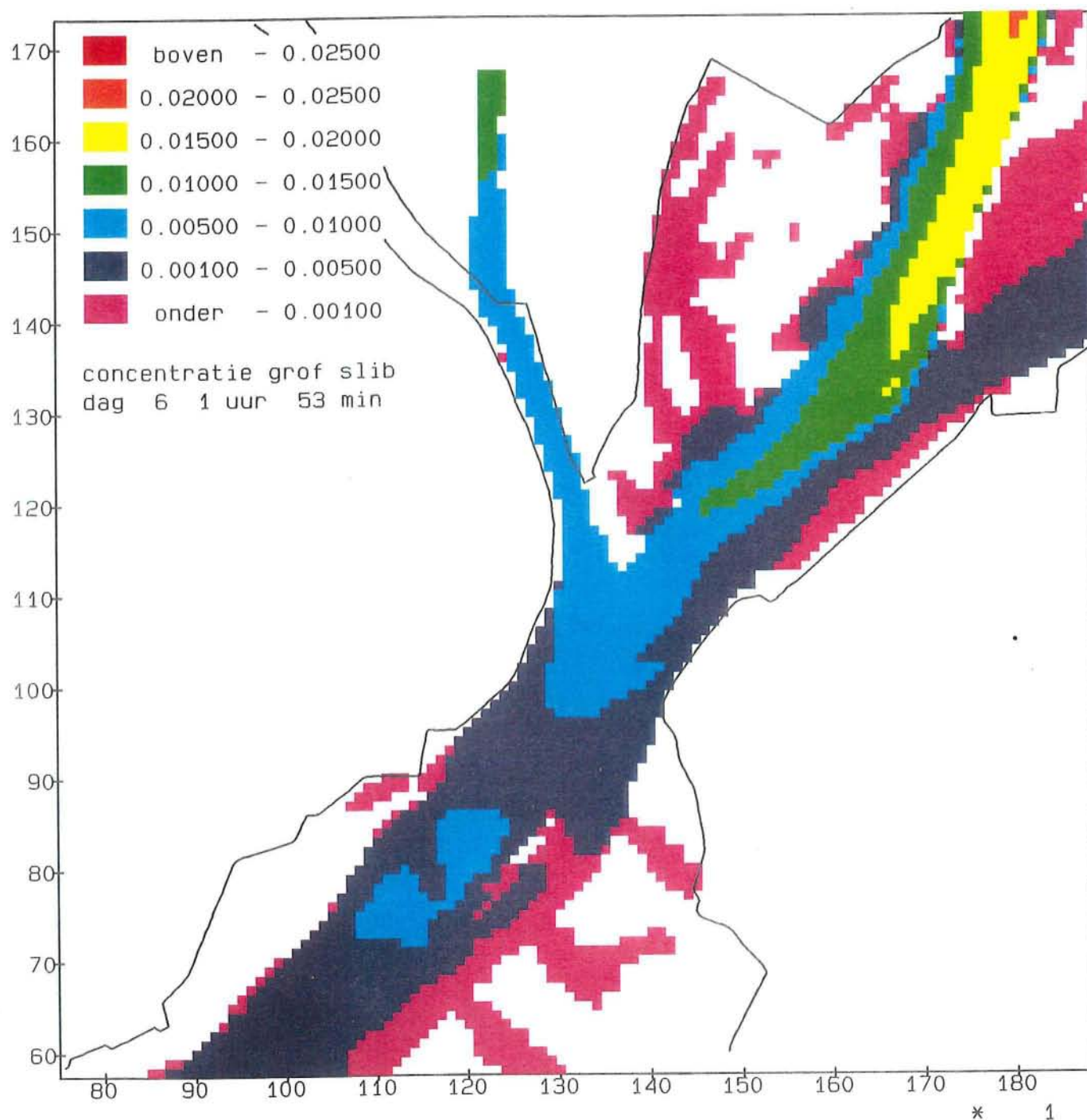
Figuur 4 Tijdens vloed

V.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafv 2200 m³/s, figuur 1

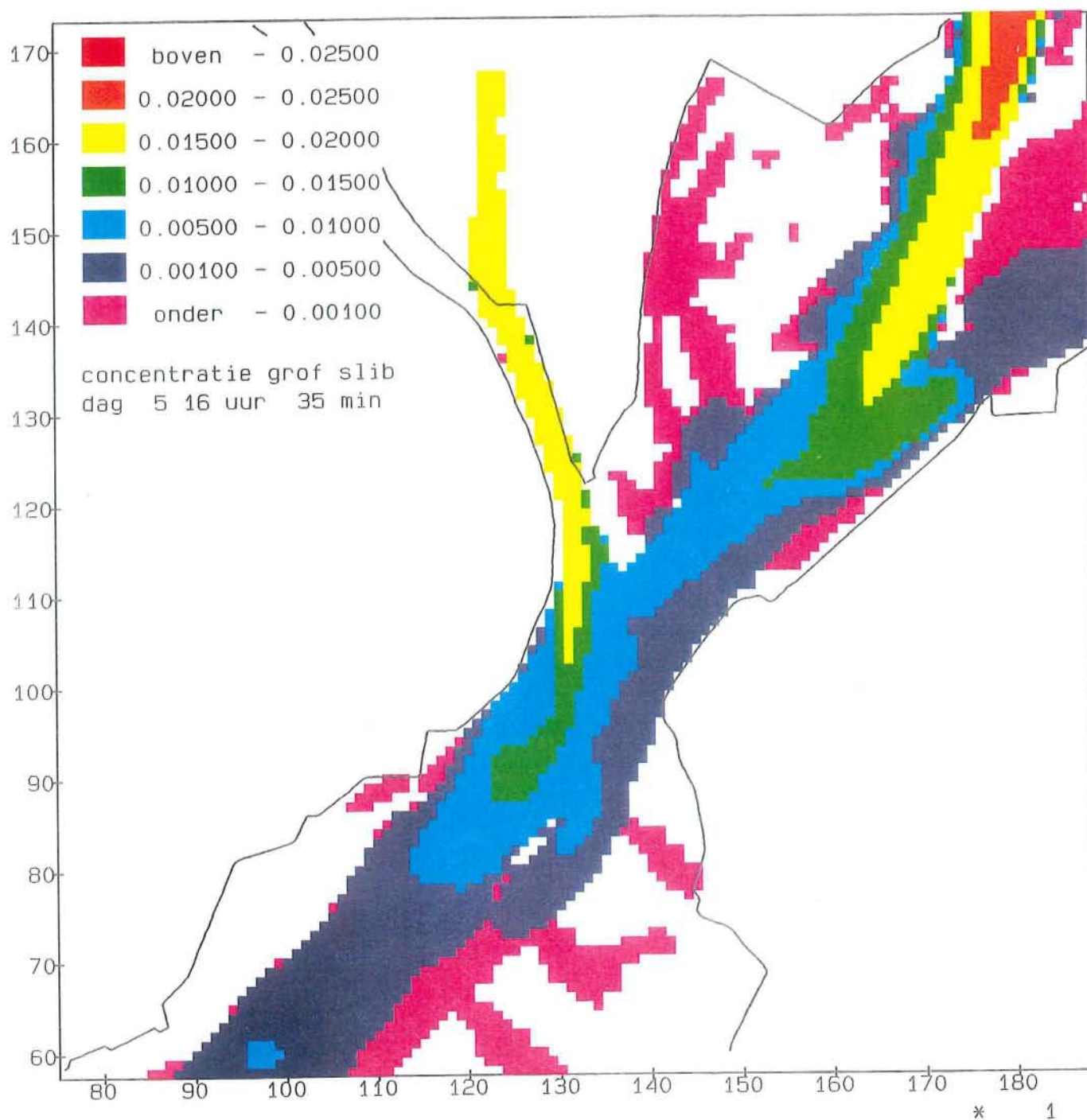
Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

V.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafo 2200 m³/s, figuur 2

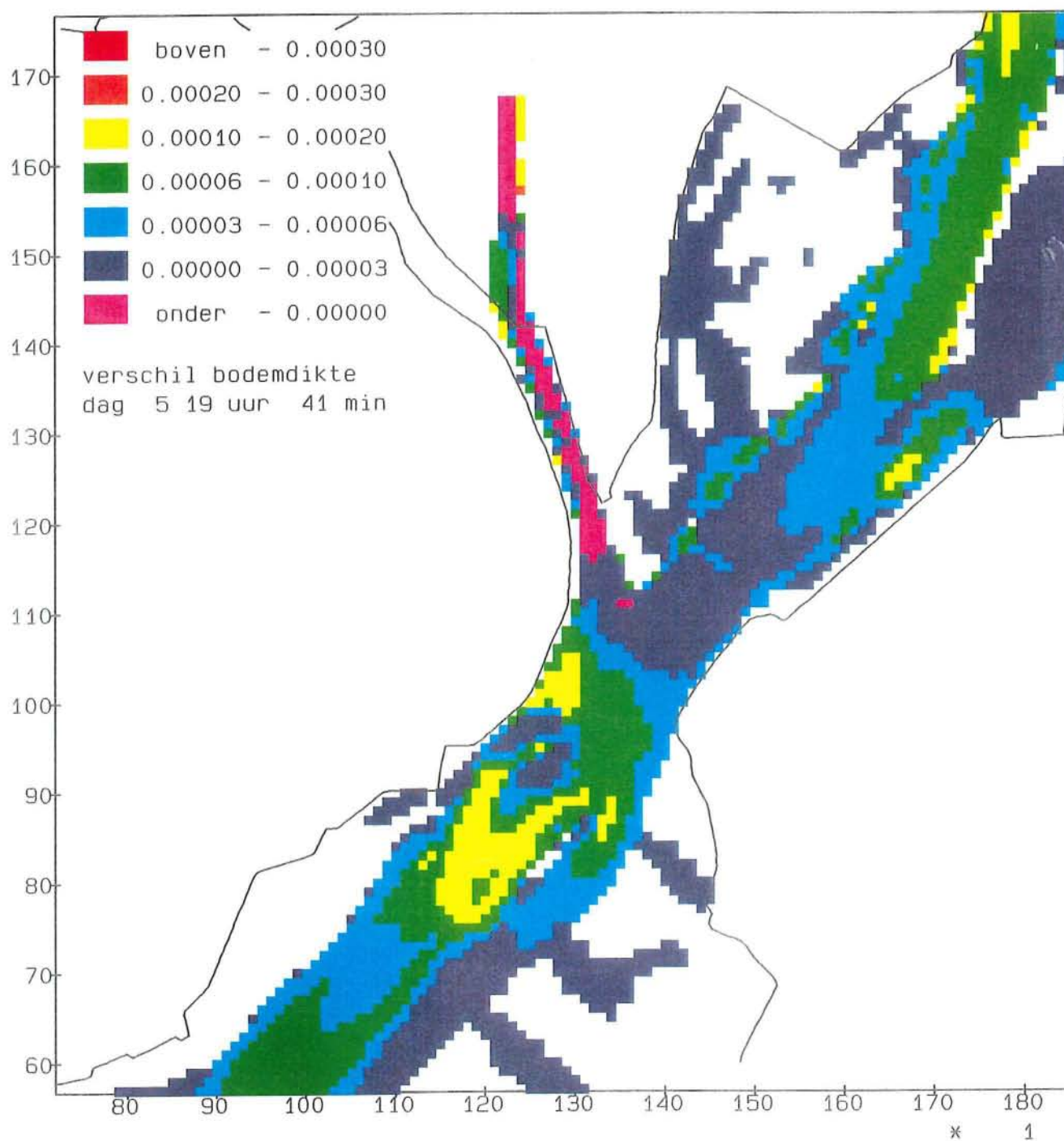
Figuur 2 Tijdens eb

V.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafo 2200 m³/s, figuur 3

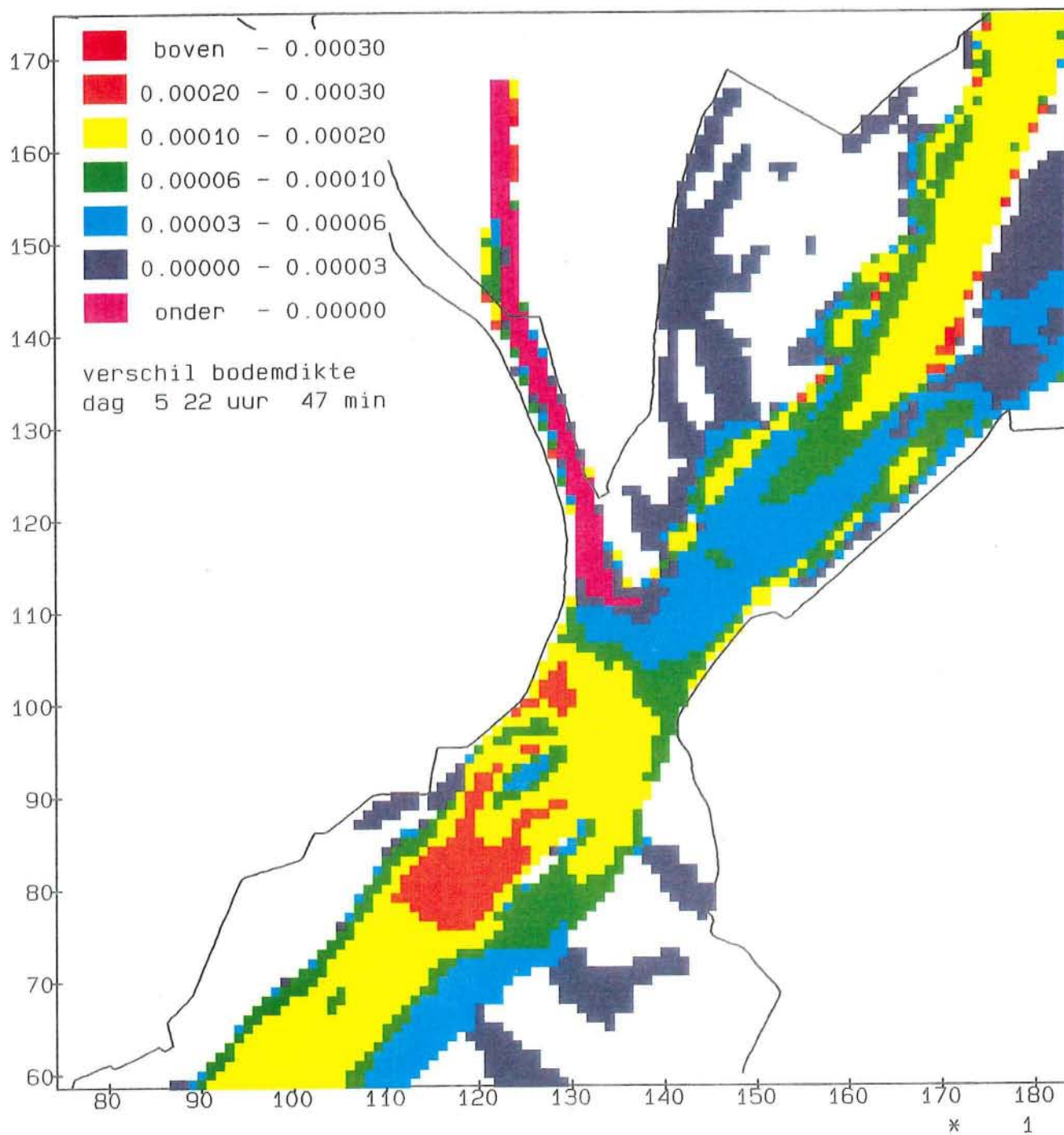
Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

V.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafv 2200 m³/s, figuur 4

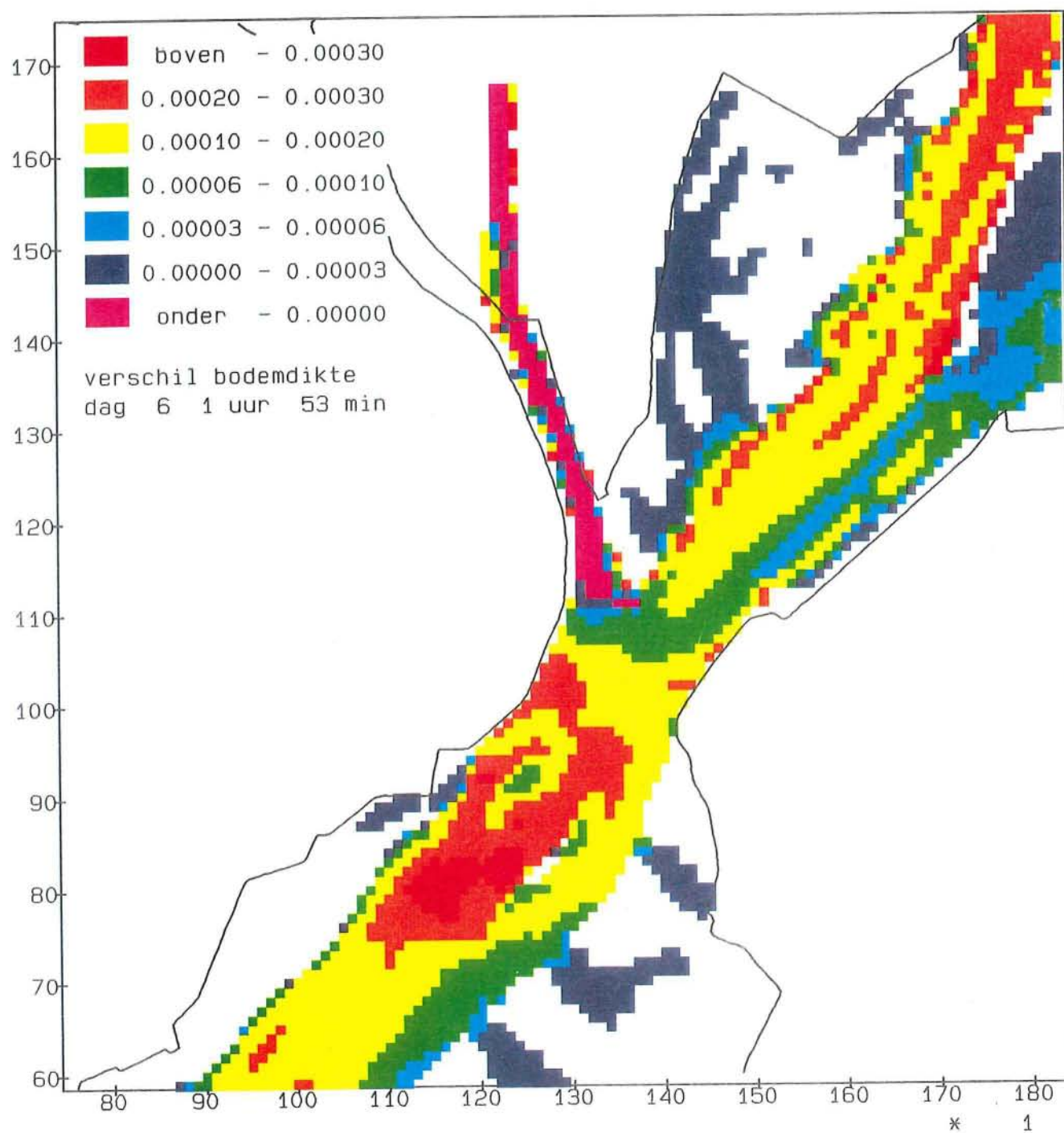
Figuur 4 Tijdens vloed

V.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalt. bij Rijnafv. 2200 m³/s, figuur 1

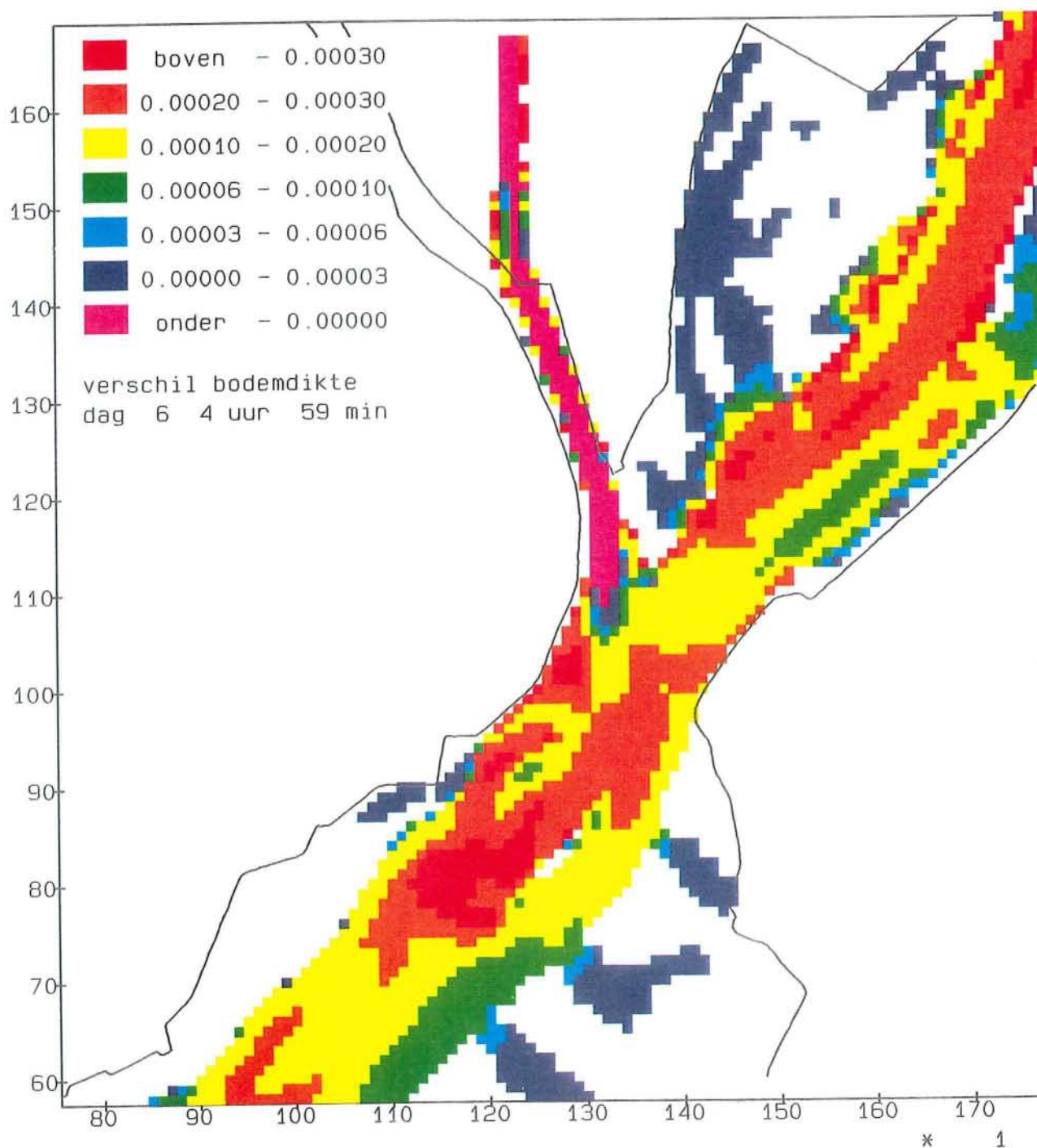
Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

V.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalt. bij Rijnafv. 2200 m³/s, figuur 2

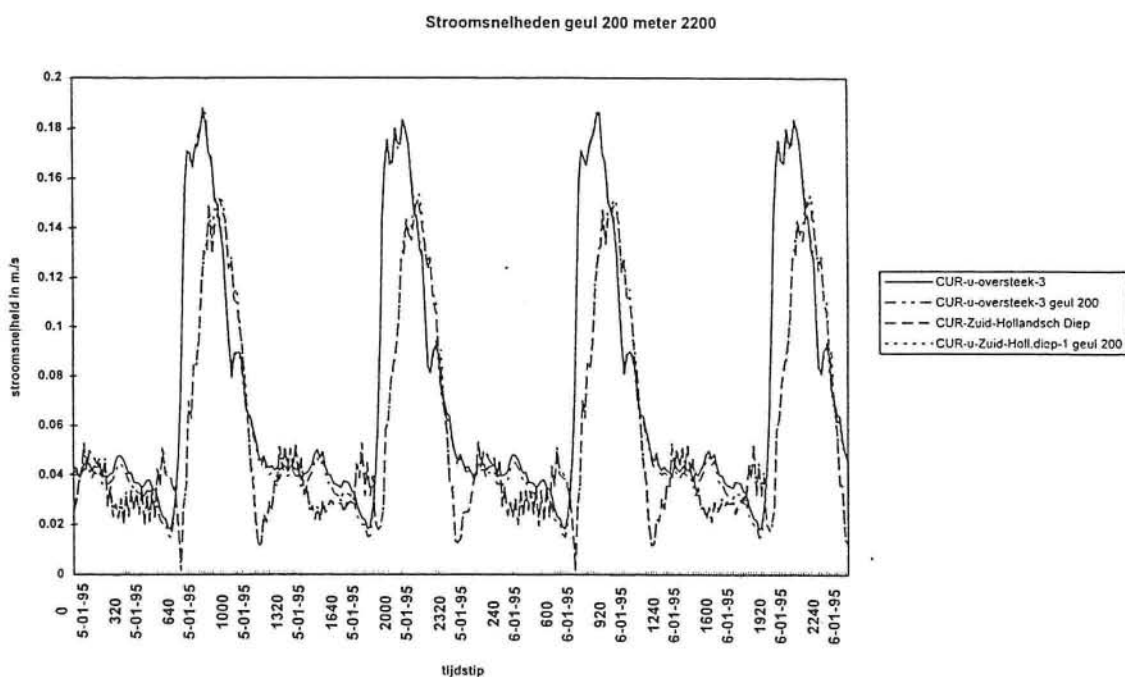
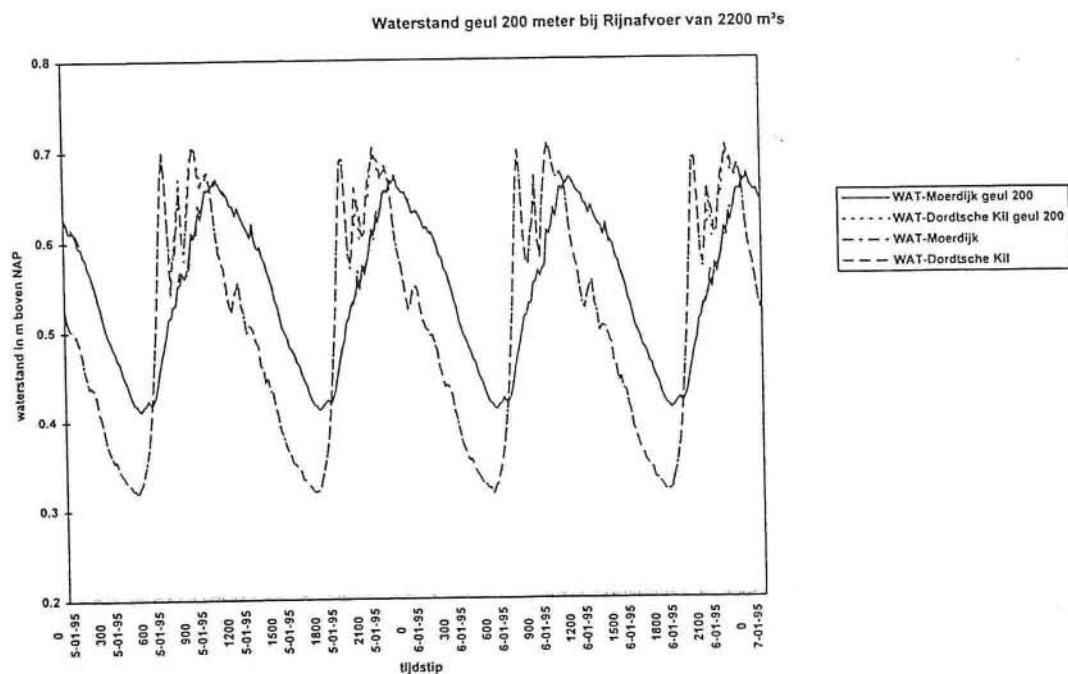
Figuur 2 Tijdens eb

V.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalt. bij Rijnafv. 2200 m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

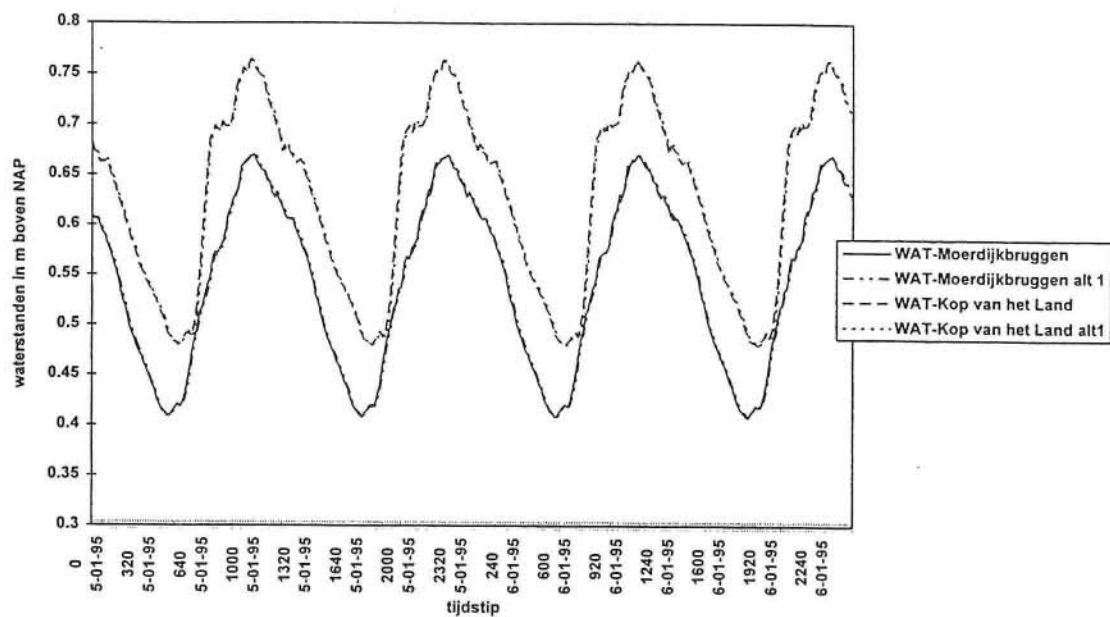
V.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalt. bij Rijnafv. 2200 m³/s, figuur 4

Figuur 4 Tijdens vloed

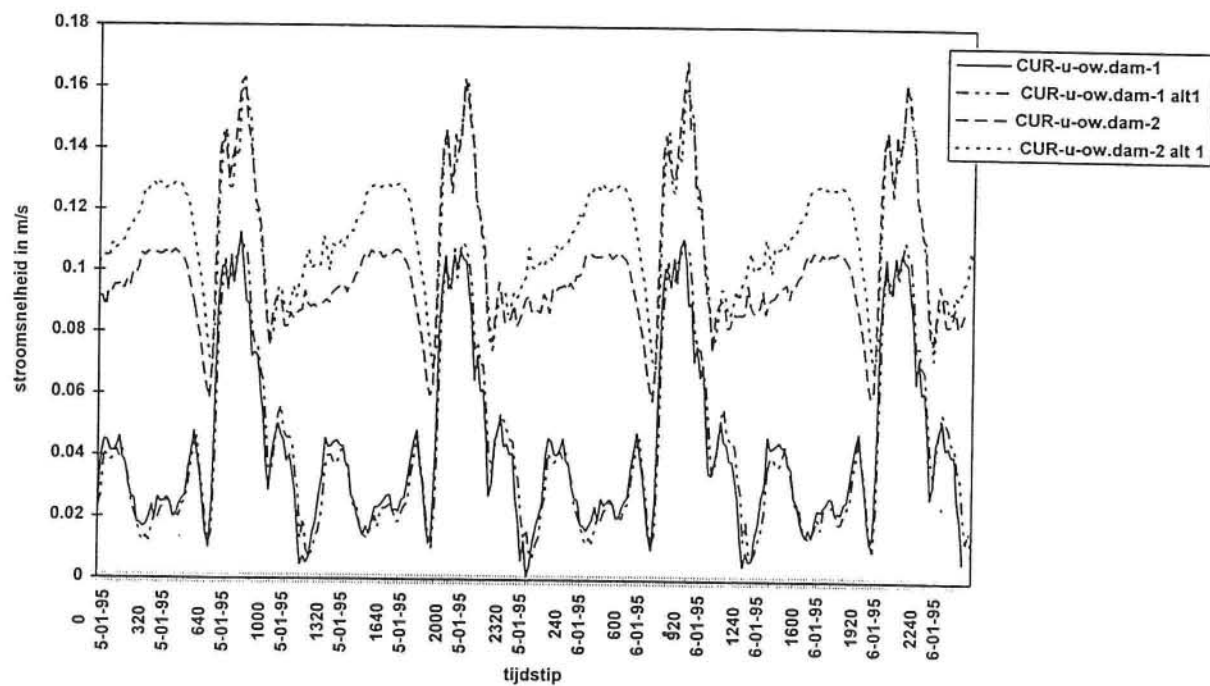
V.2.1 Waterbeweging met verdiepte geul bij Rijnafv. 2200 m³/s

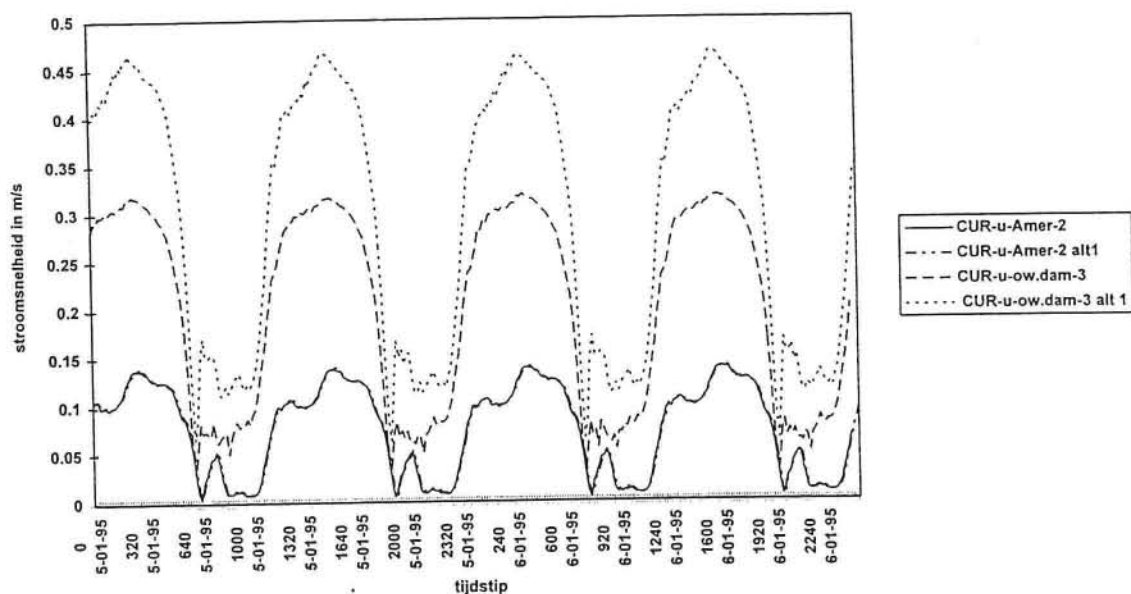
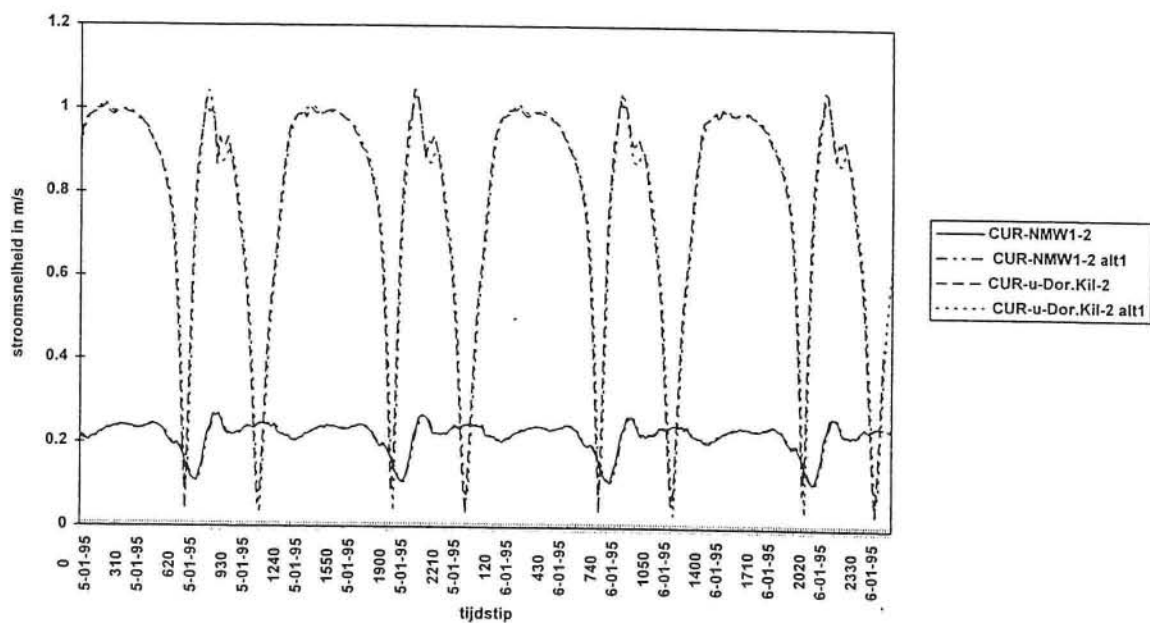
V.3.1 Waterbeweging met alternatief 1 bij Rijnafv. 2200 m³/s

Waterstanden alternatief 1 bij Rijnafvoer van 2200 m³/s

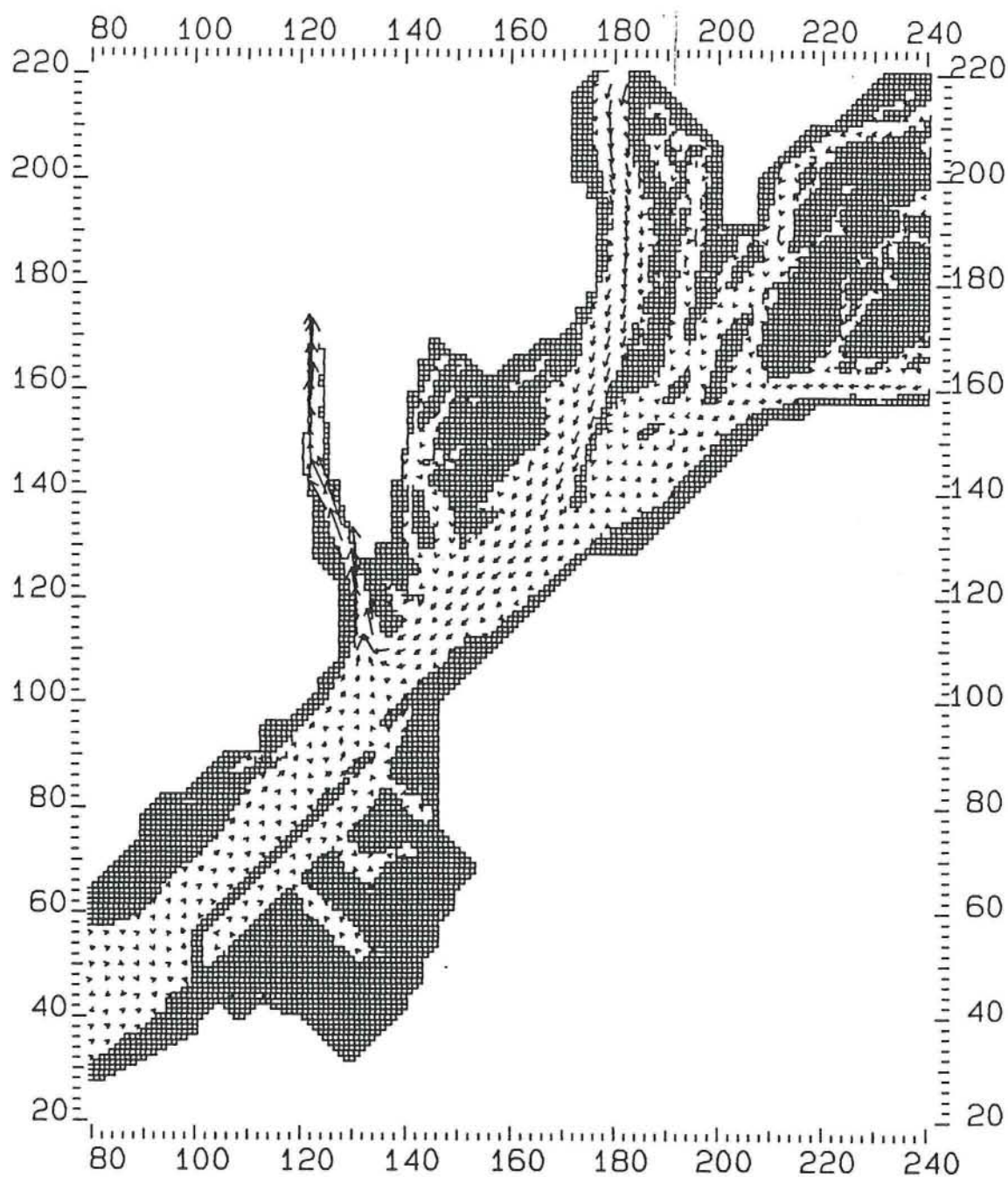


Stroomsnelheden alternatief 1 boven onderwaterdam bij Rijnafvoer van 2200 m³/s



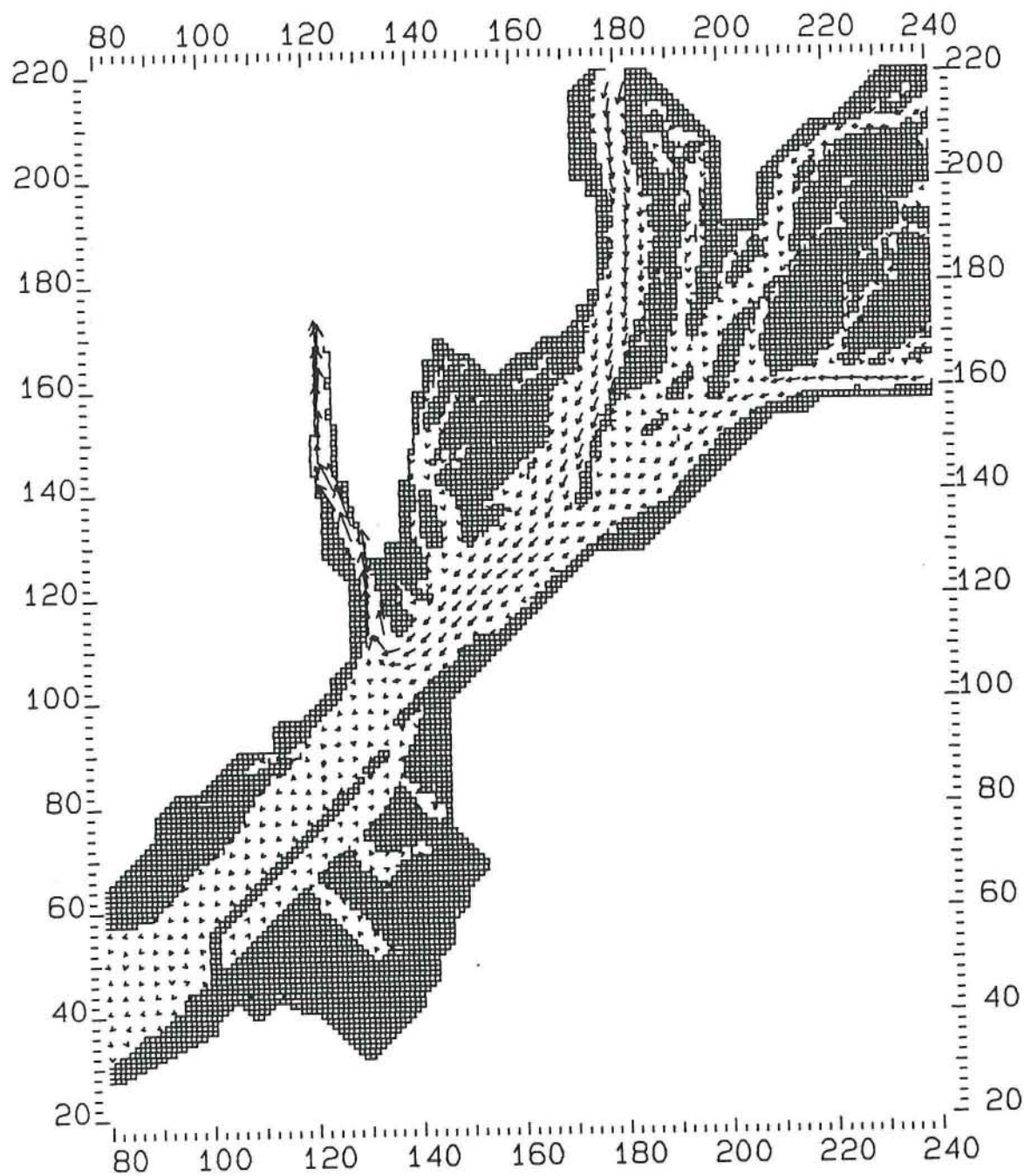
V.3.1 Waterbeweging met alternatief 1 bij Rijnafoer 2200 m³/s, vervolgStroomsnelheden bij alternatief 1 en nulalternatief bij Rijnafoer van 2200 m³/sStroomsnelheden bij Rijnafoer van 2200 m³/s

V.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep, figuur 1



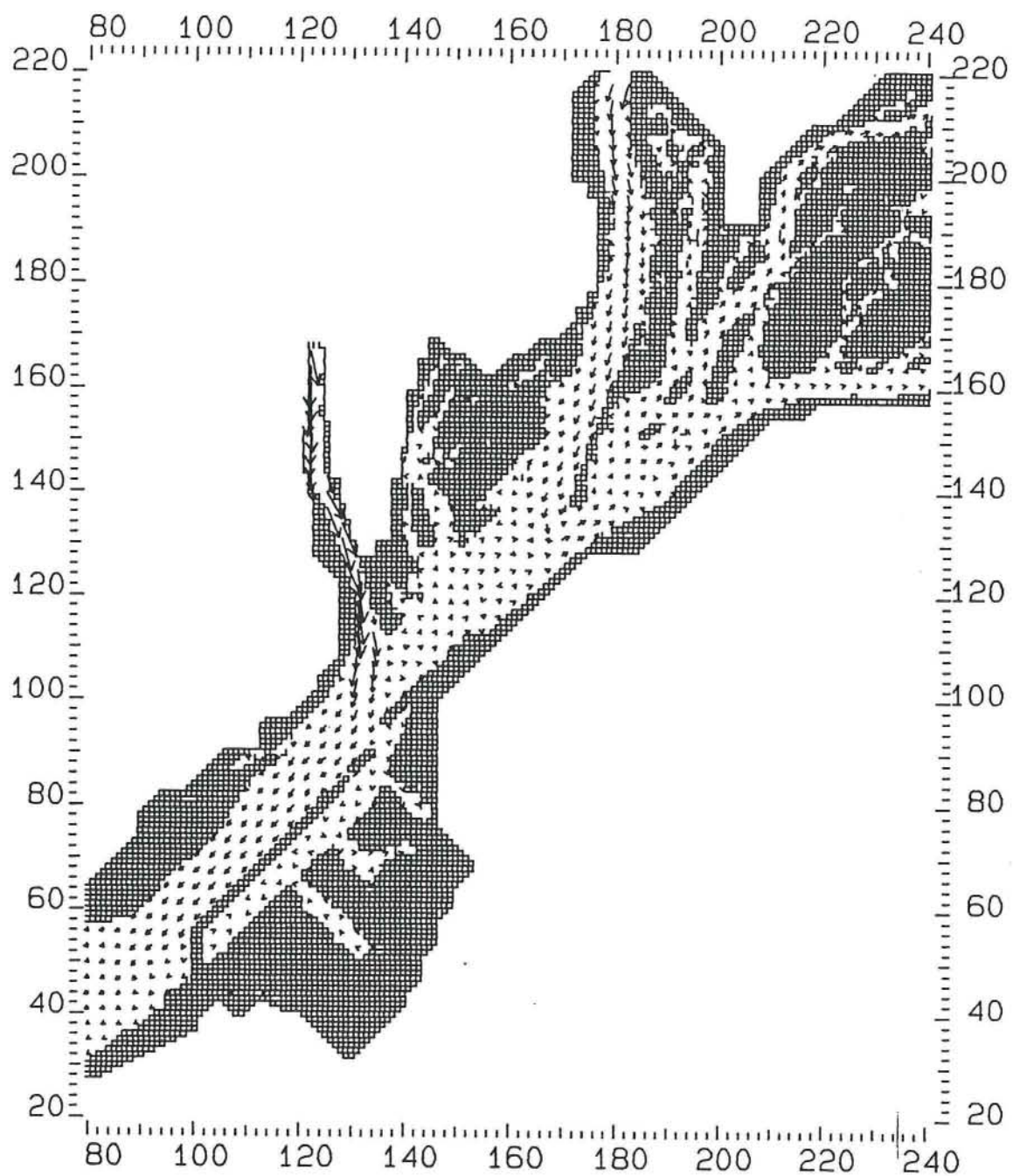
Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

V.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep, figuur 2



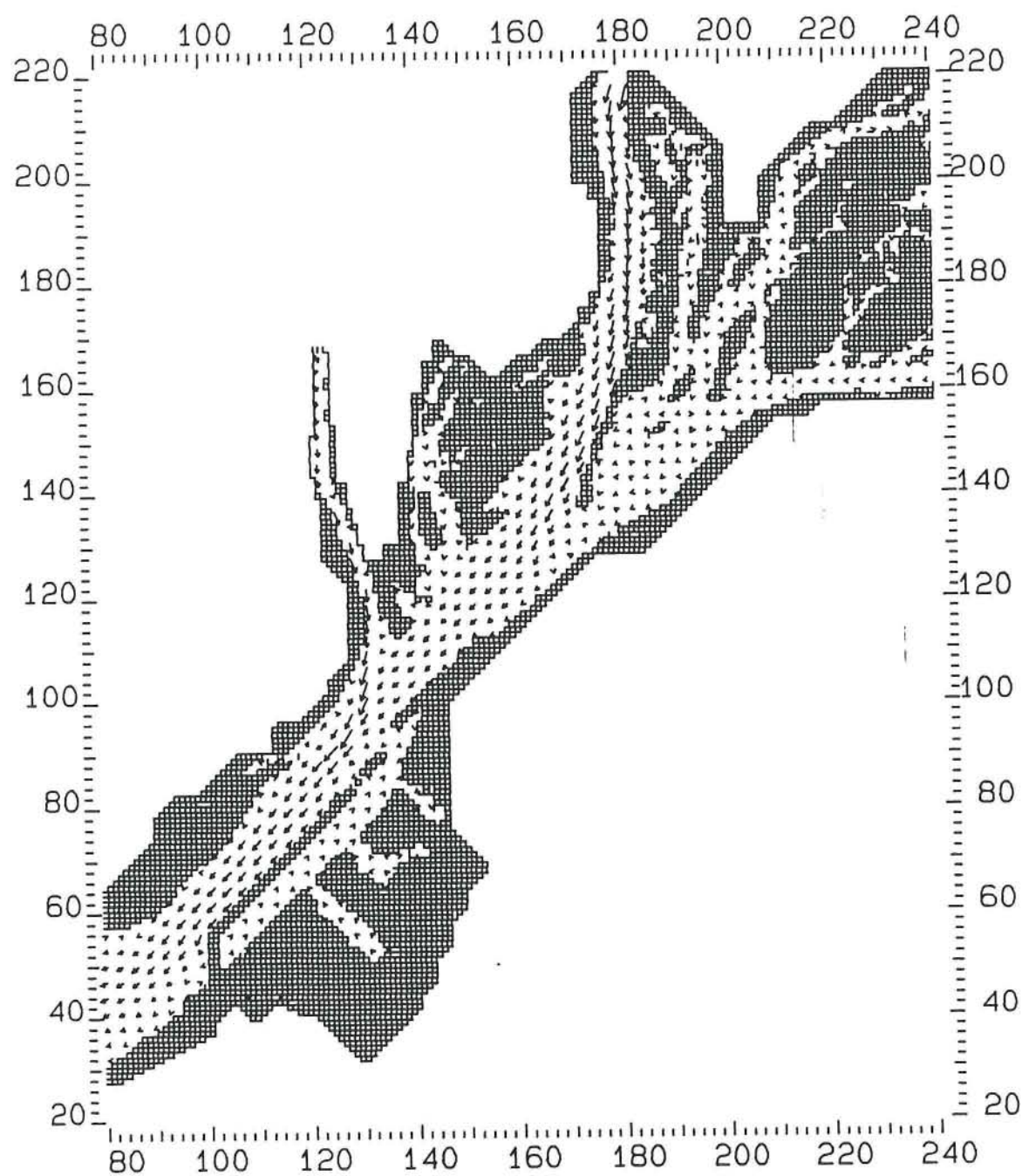
Figuur 2 Tijdens eb

V.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep, figuur 3



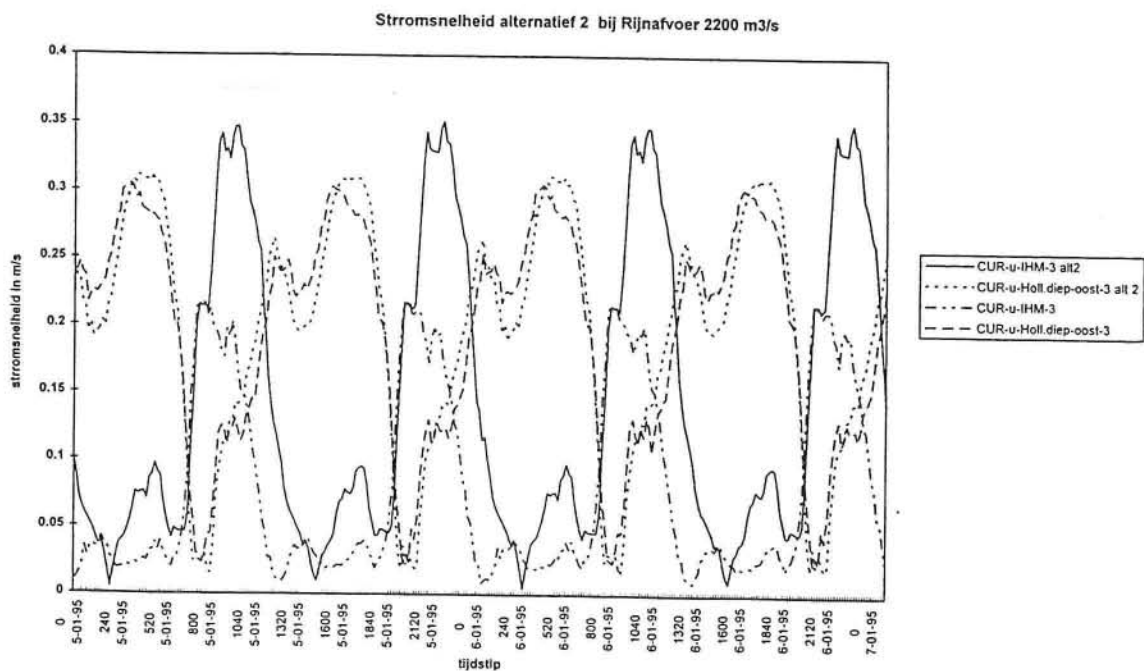
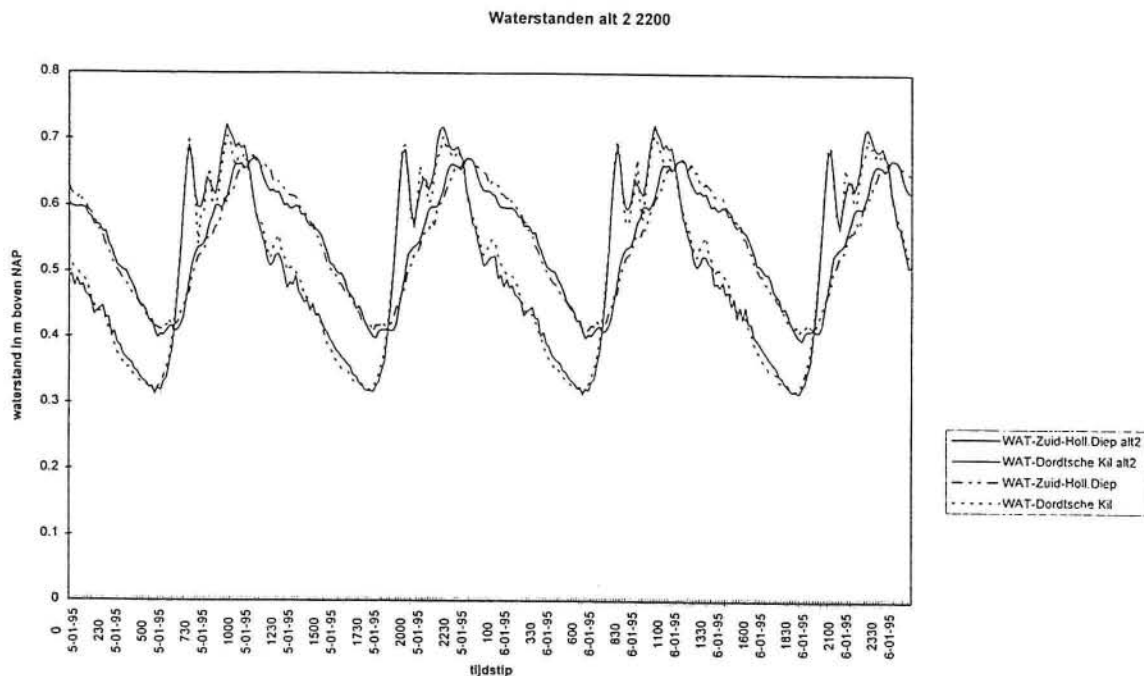
Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

V.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep, figuur 4

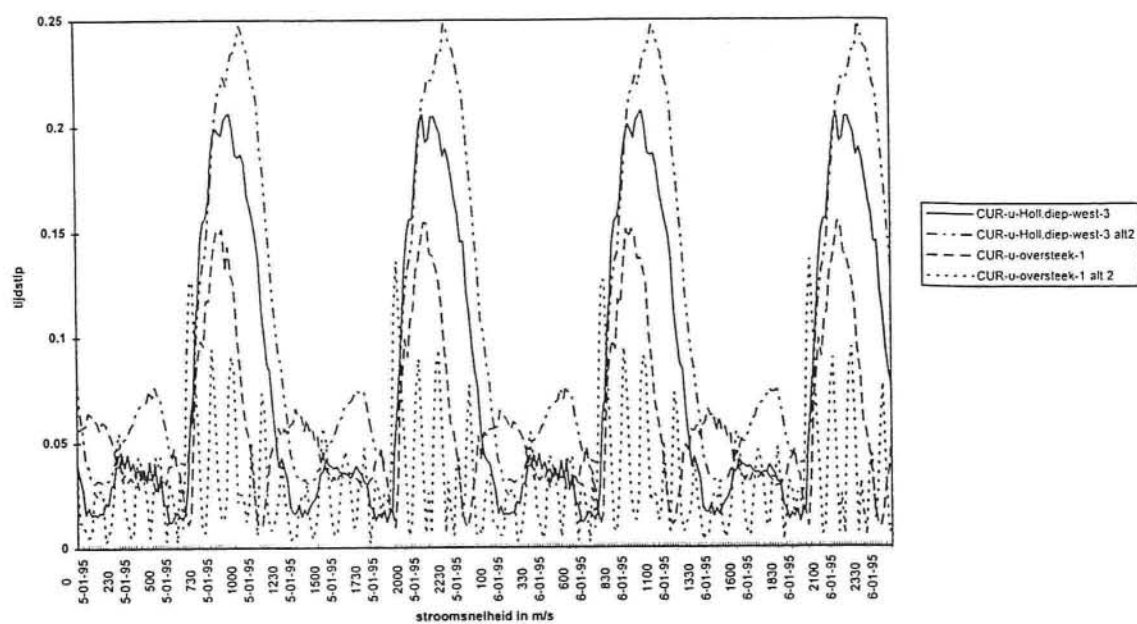
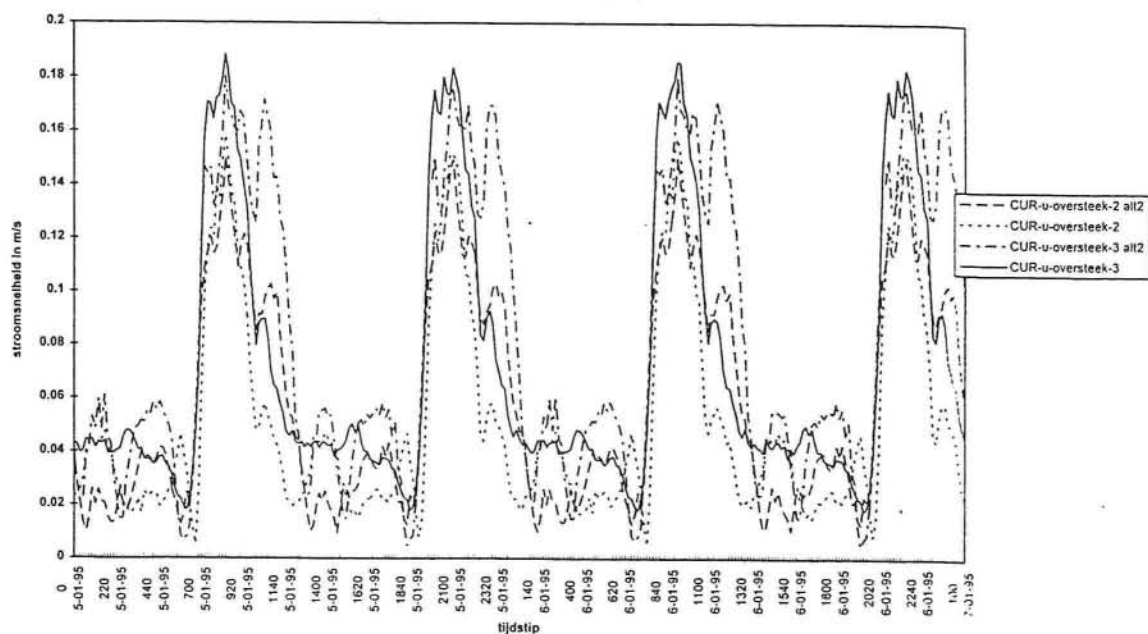


Figuur 4 Tijdens vloed

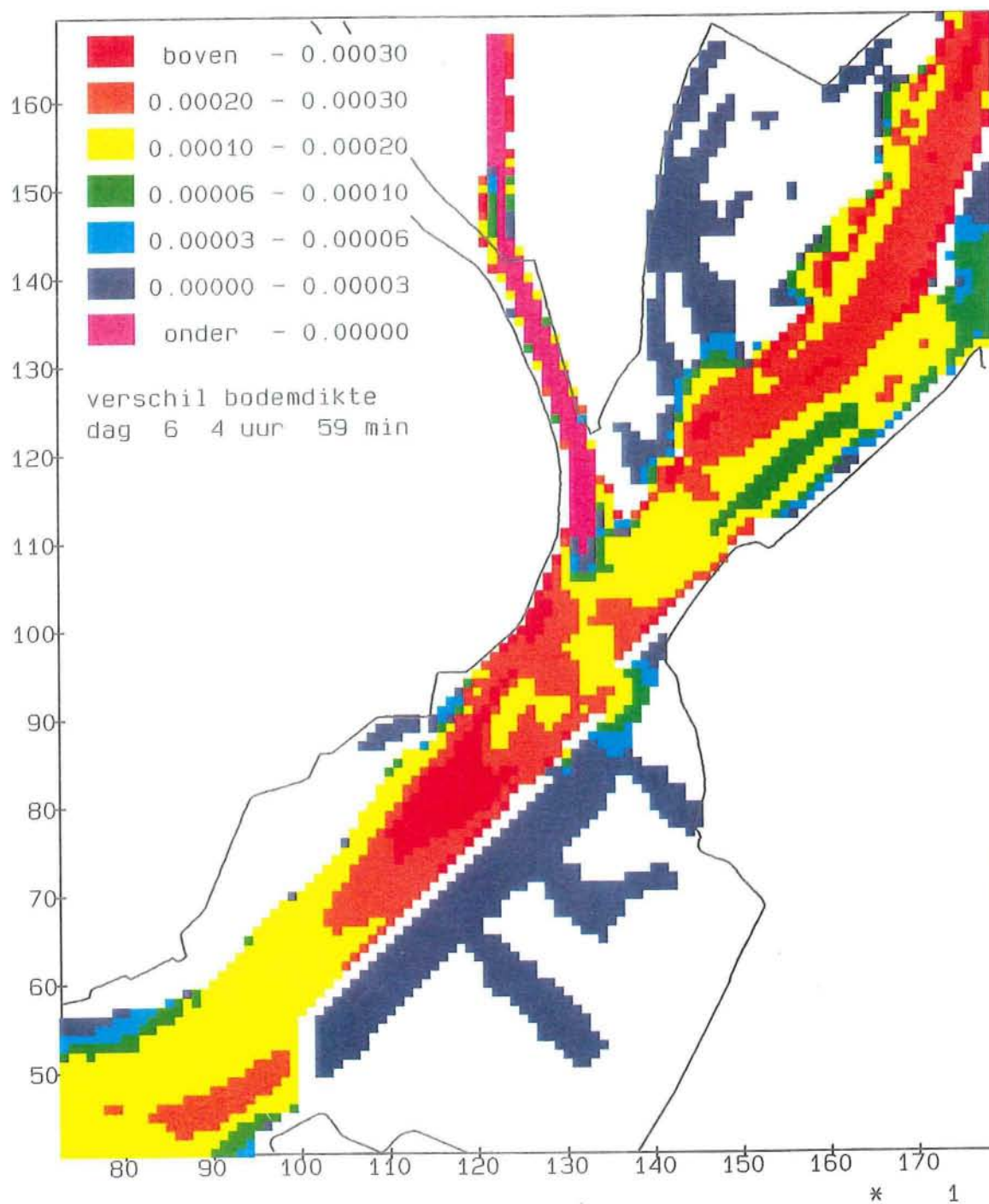
V.4.2 Waterbeweging alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep



V.4.2 Waterbeweging alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep, vervolg

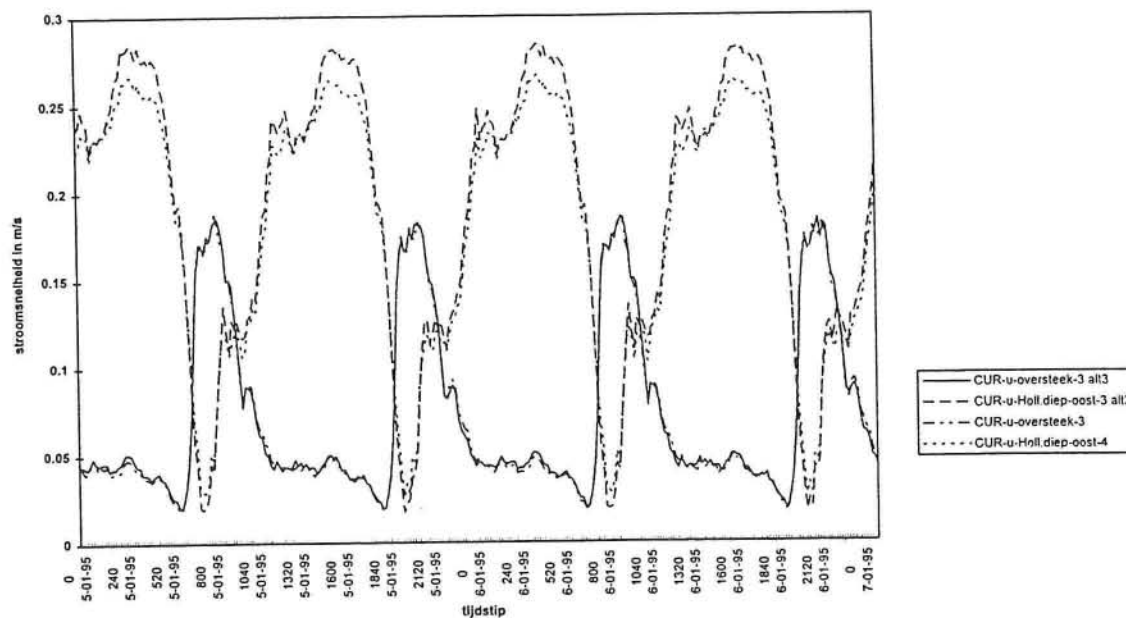
Stroomsnelheden bij alternatief 2 bij Rijnafvoer van 2200m³/sStroomsnelheden alternatief 2 bij Rijnafvoer 2200 m³/s

V.4.3 Sedimentatie bij alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Zuid-Hollandsch Diep

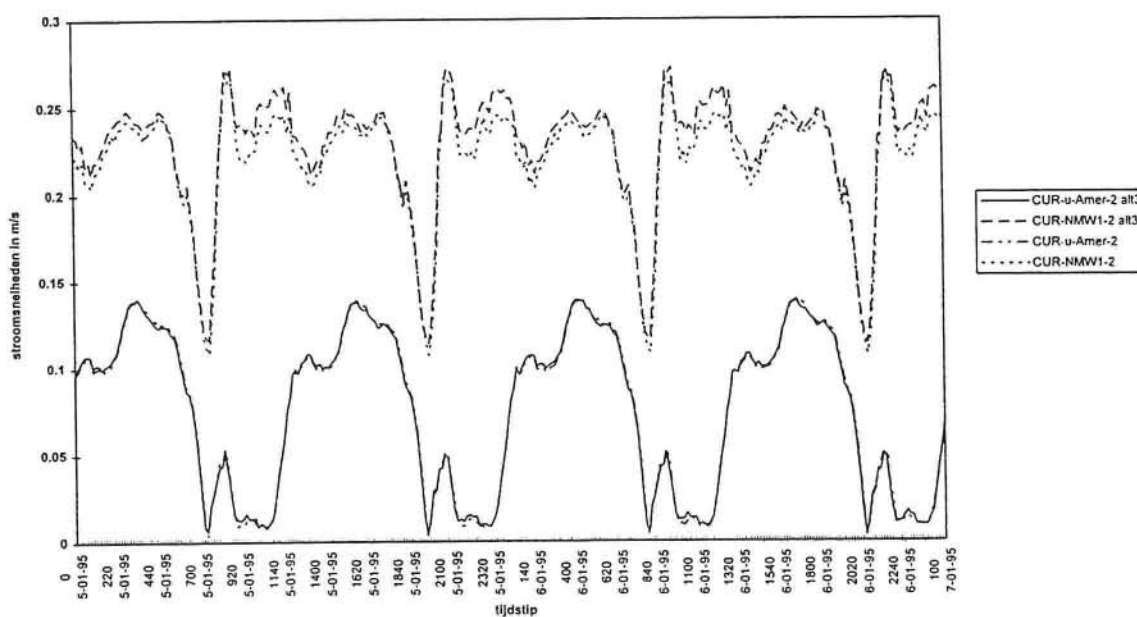


V.5.1 Waterbeweging bij alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van zeevaartgeul

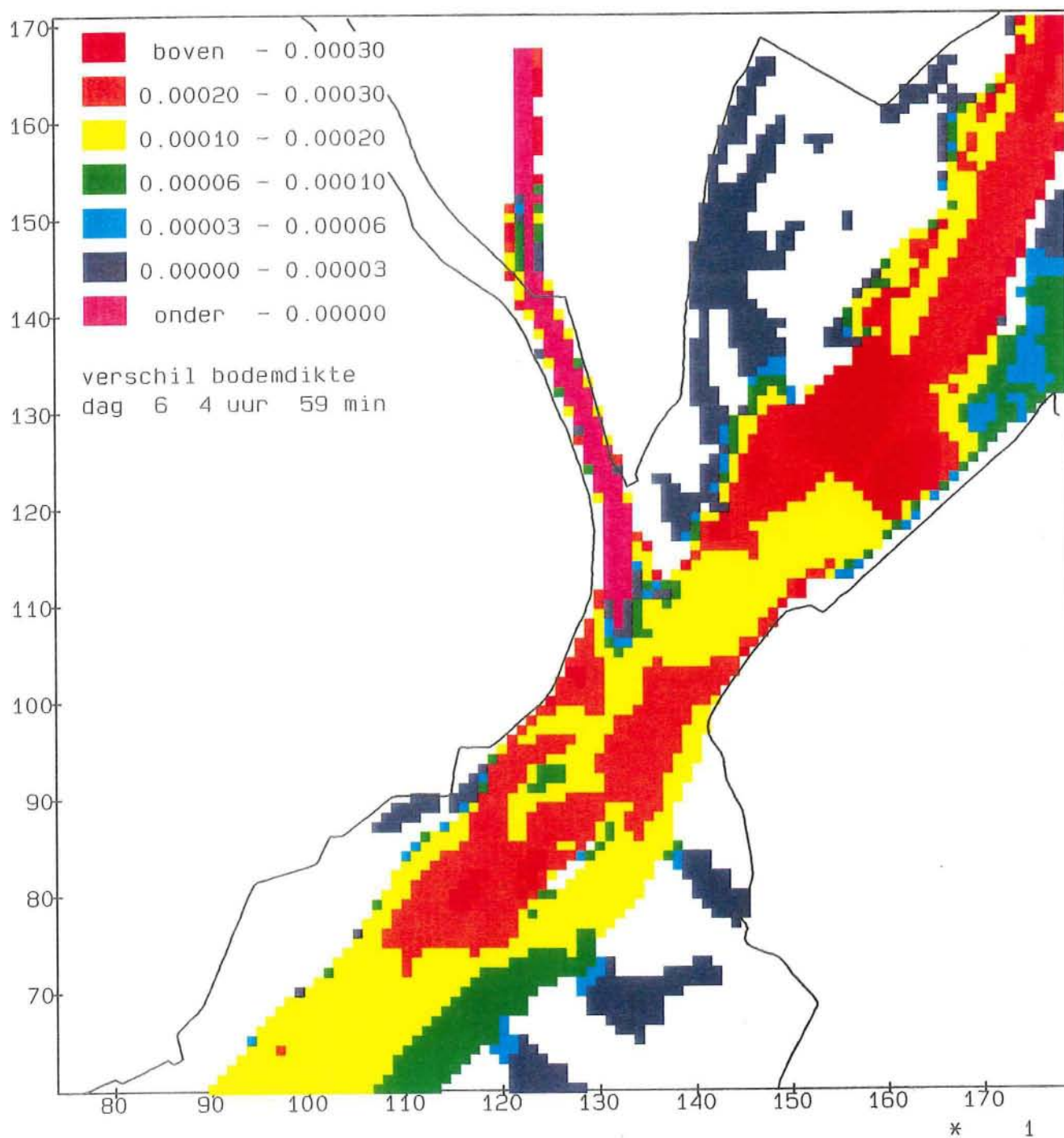
Stroomsnelheden bij alt 3 2200

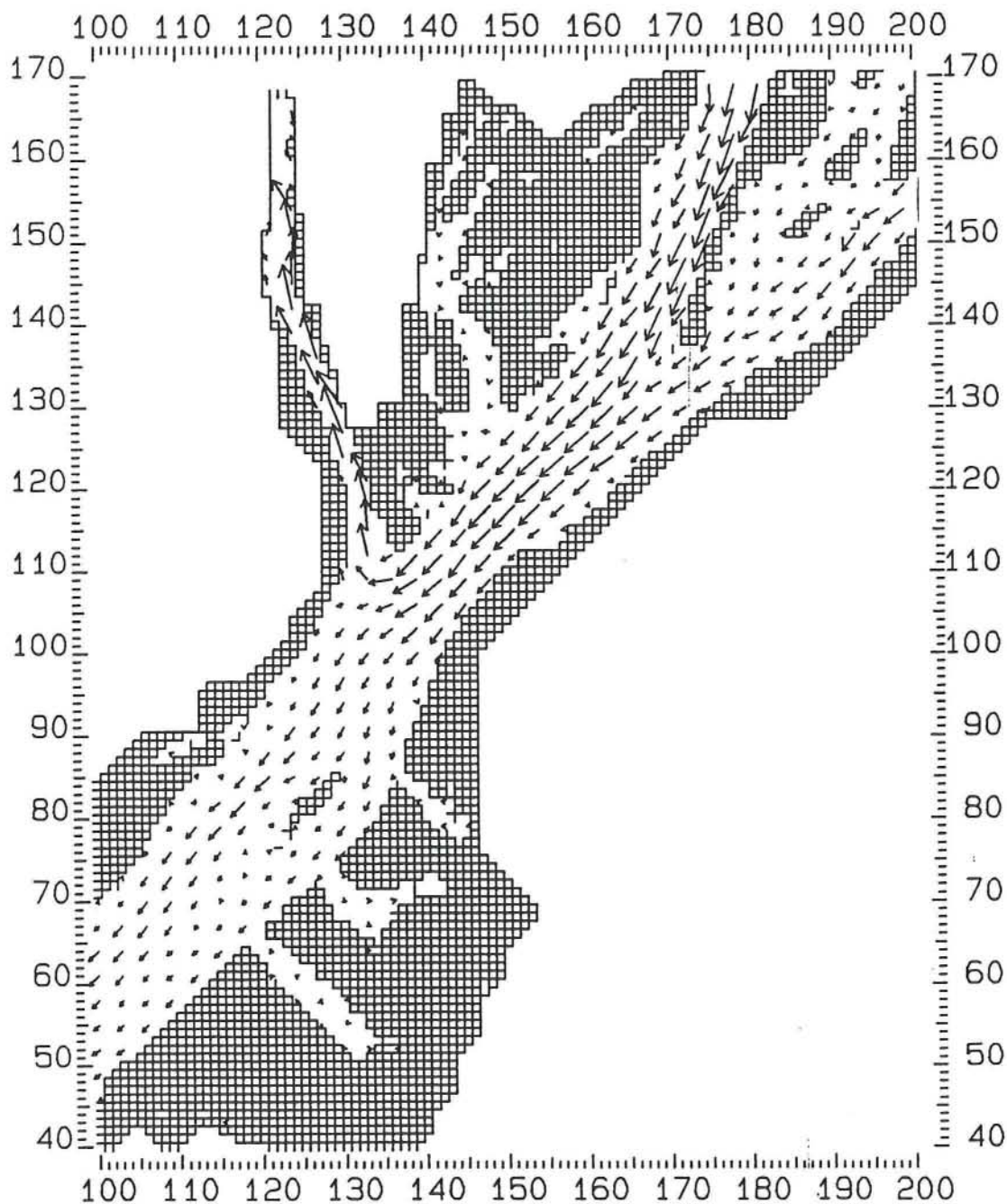


Stroomsnelheden bij alternatief 3 2200



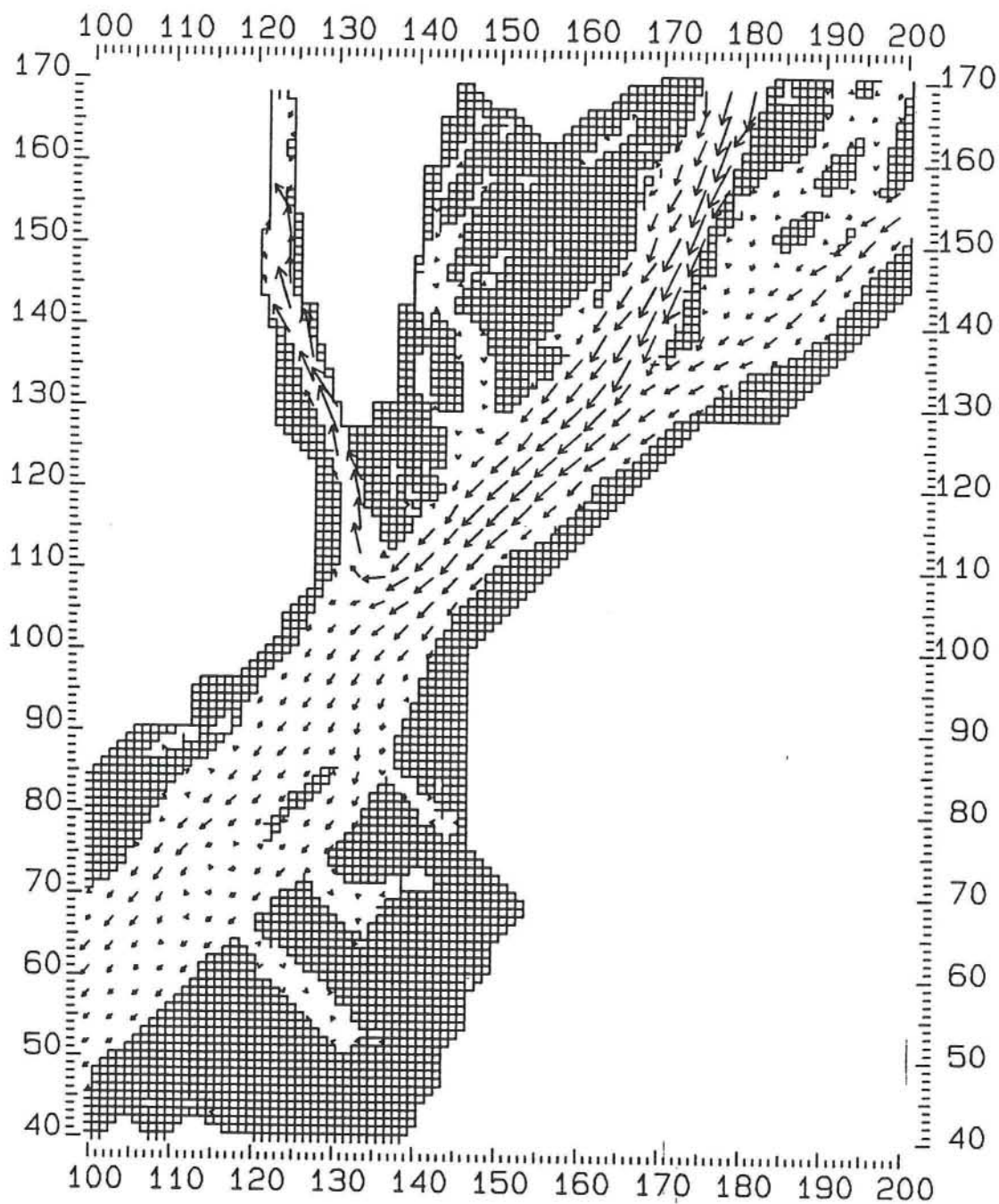
V.5.2 Sedimentatie bij alternatief 3: Sedimentvang bovenstrooms van zeevaartgeul



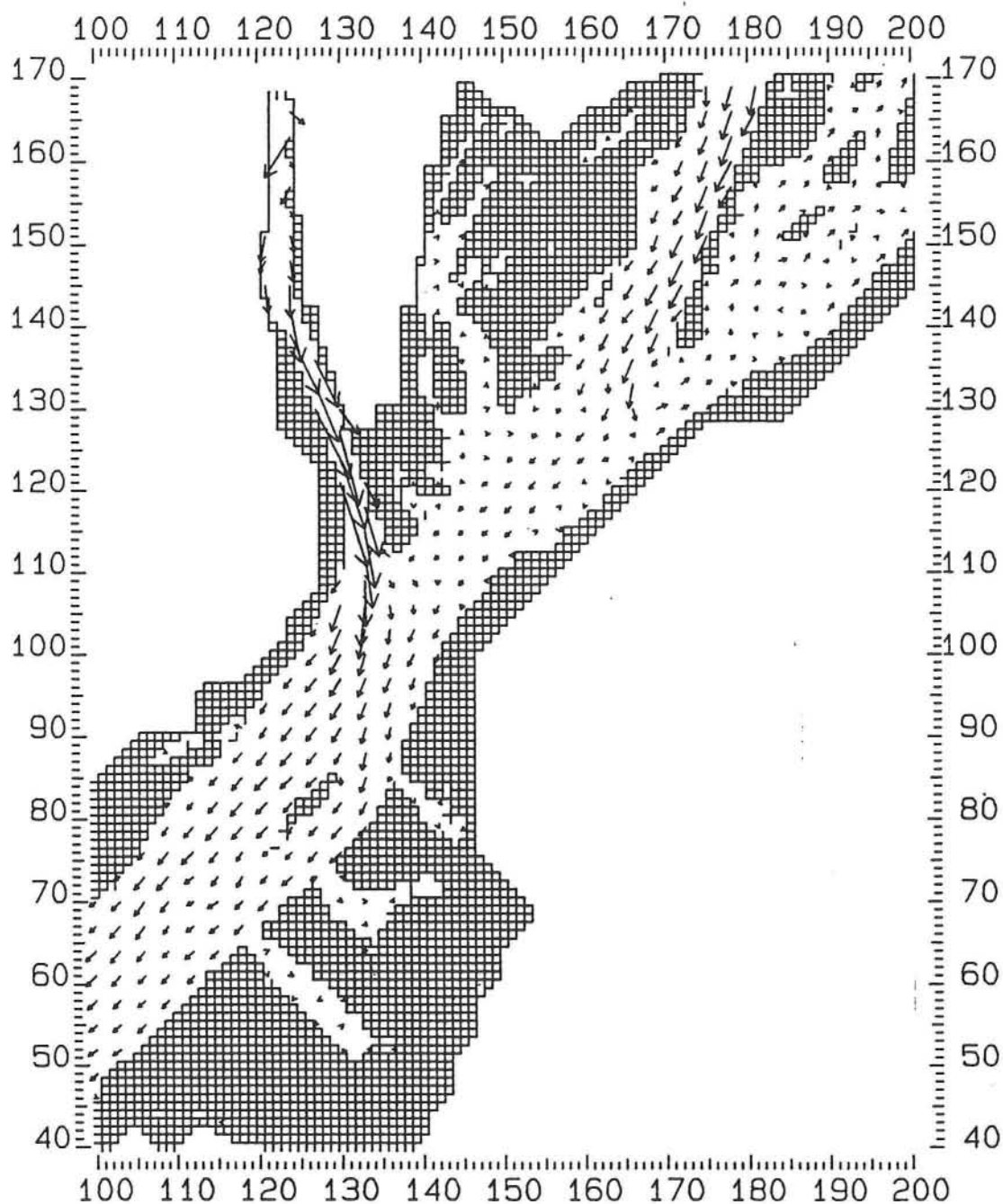
Bijlage VI Resultaten Rijnafvoer 3500 m³/s**VI.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer van 3500 m³/s, figuur 1**

Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

VI.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer van 3500 m³/s, figuur 2

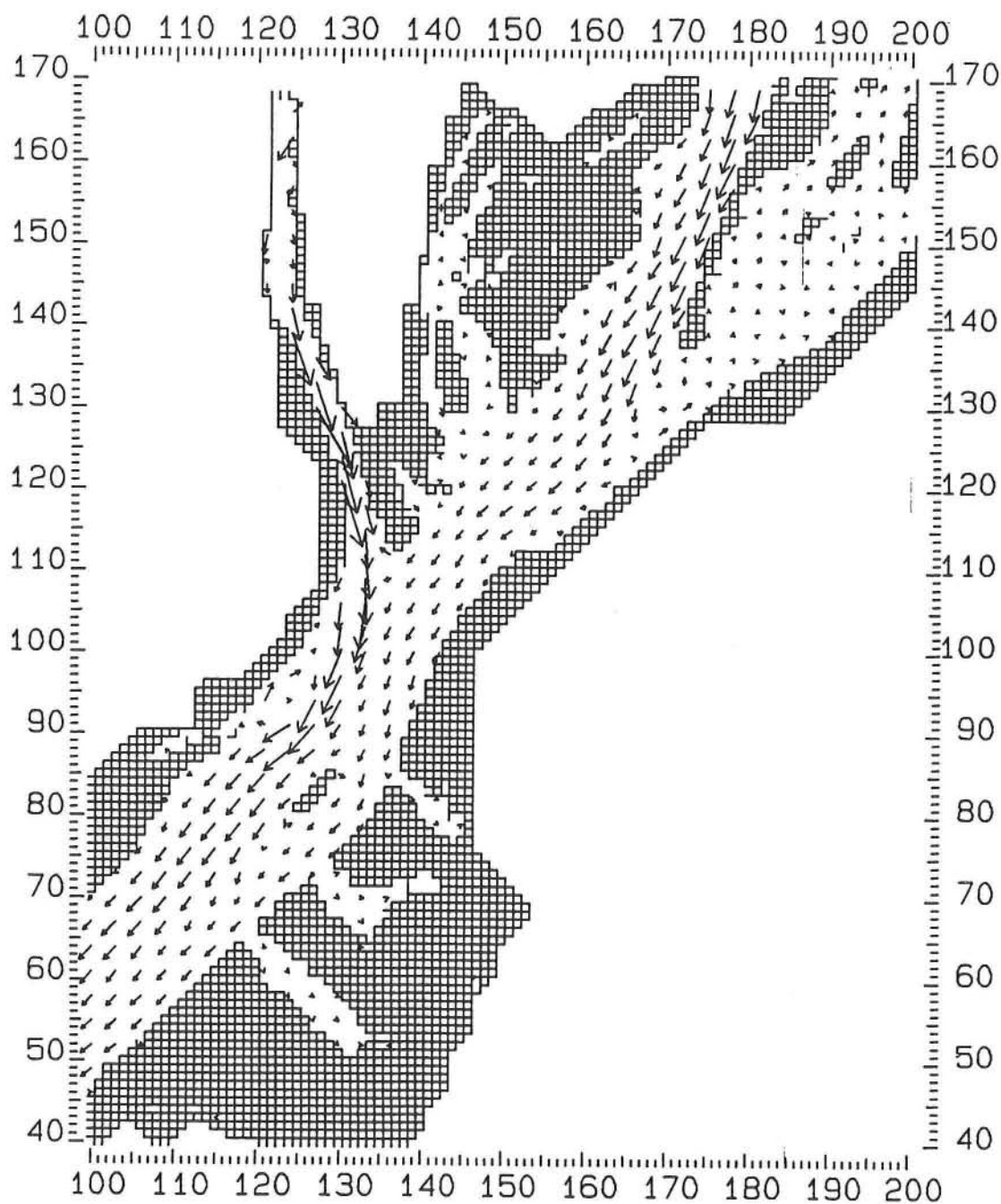


Figuur 2 Tijdens eb

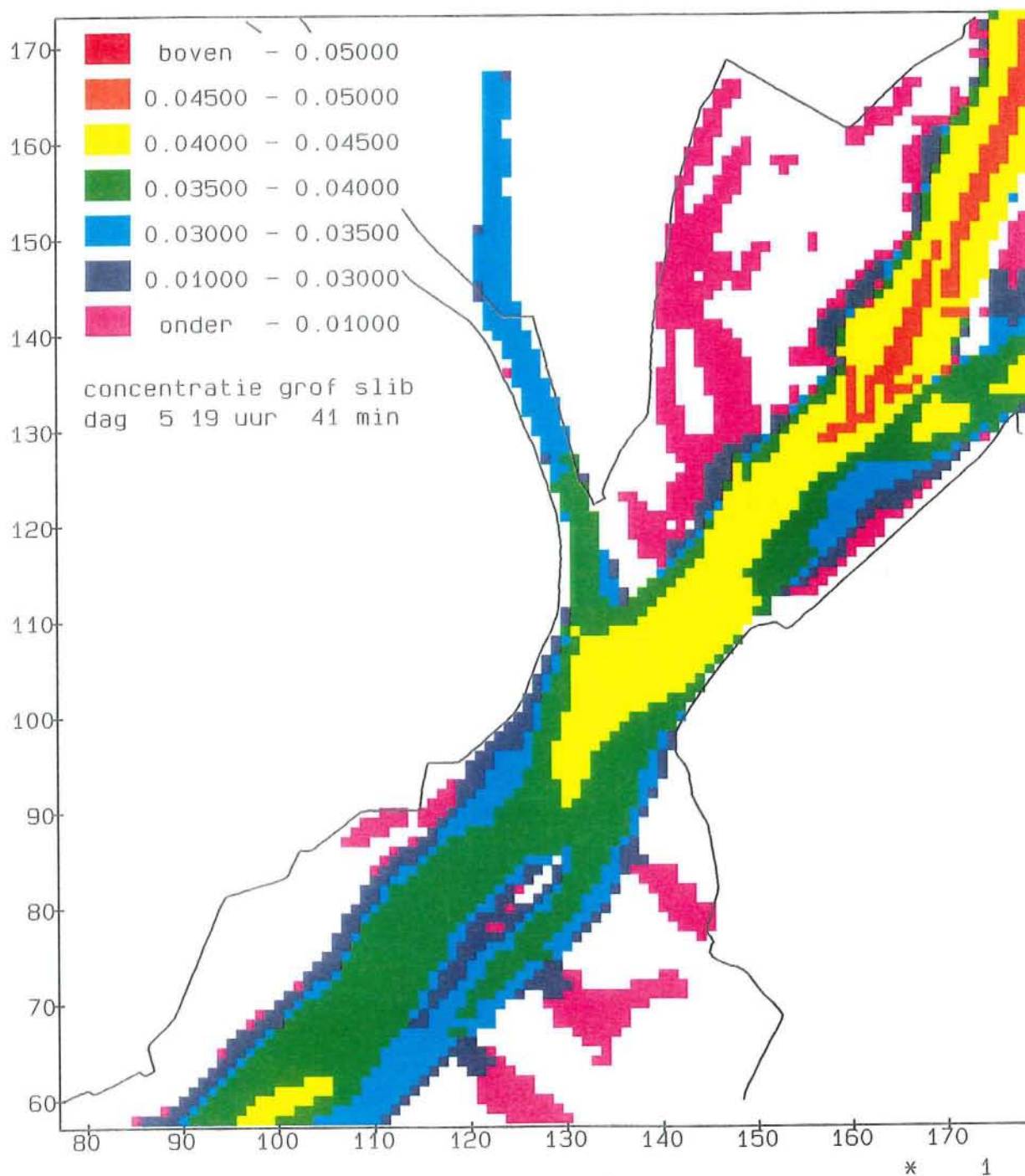
VI.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer van 3500 m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

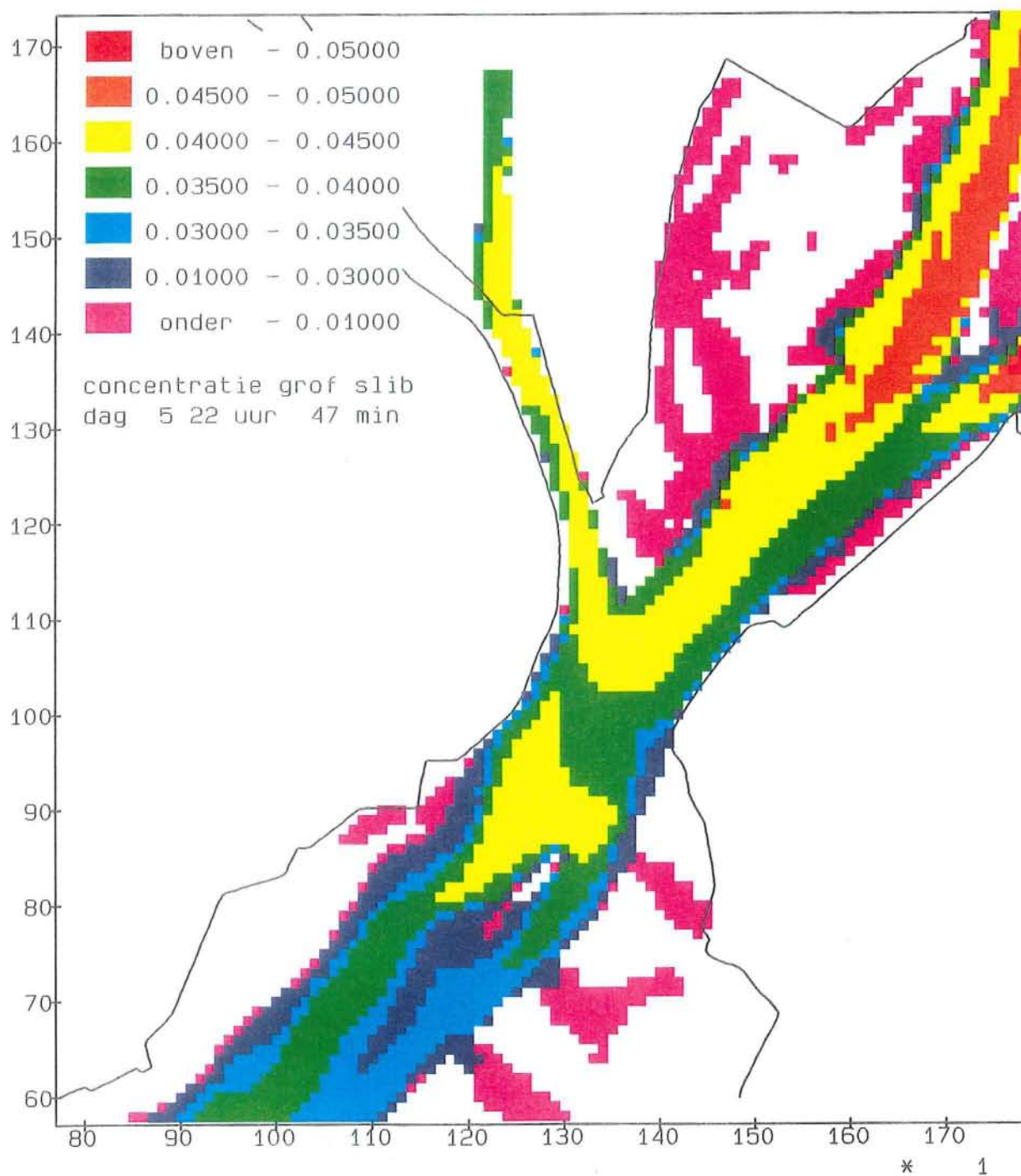
VI.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer van 3500 m³/s, figuur 4



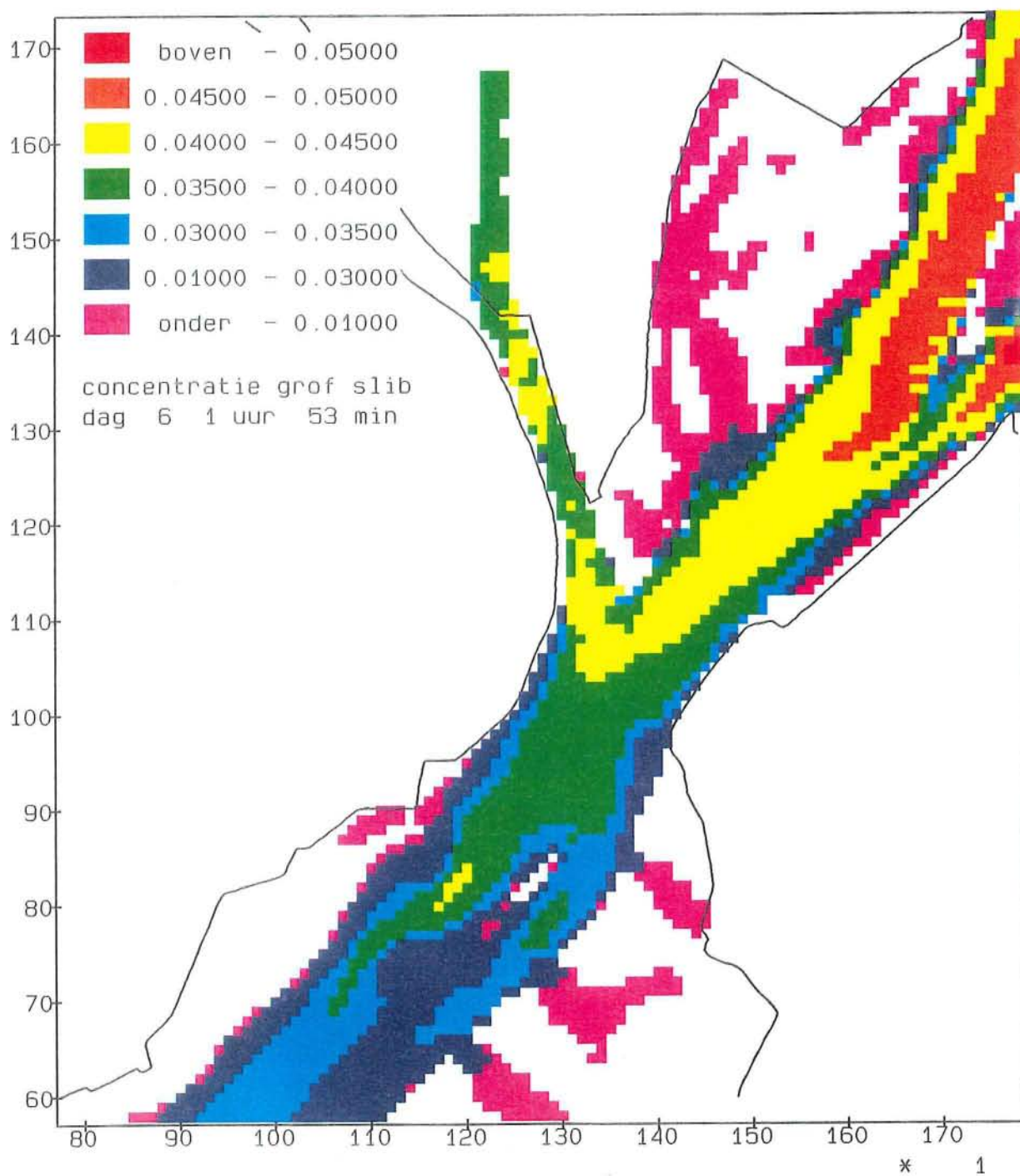
Figuur 4 Tijdens vloed

VI.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafv 3500m³/s, figuur 1

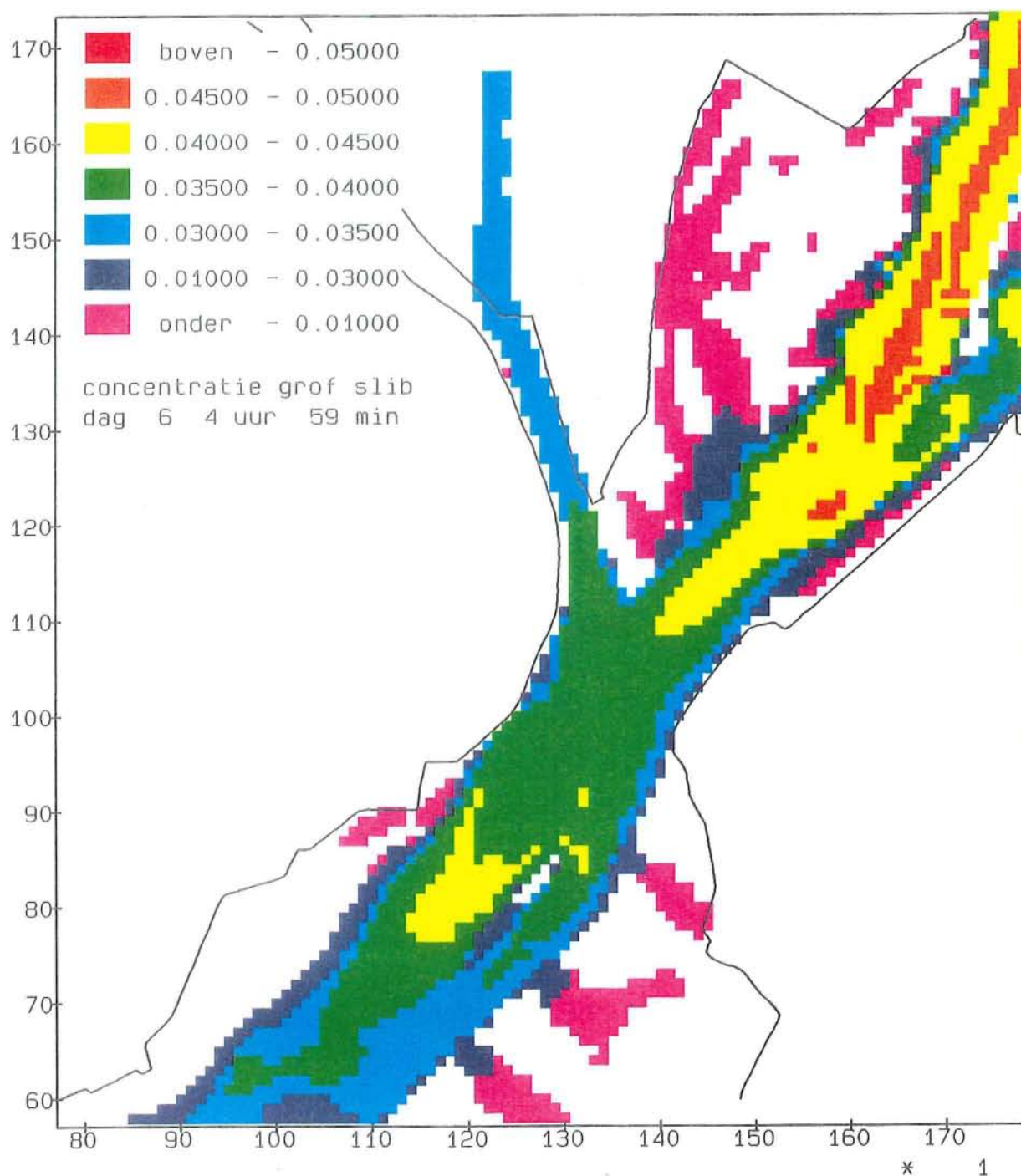
Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

VI.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafv 3500m³/s, figuur 2

Figuur 2 Tijdens eb

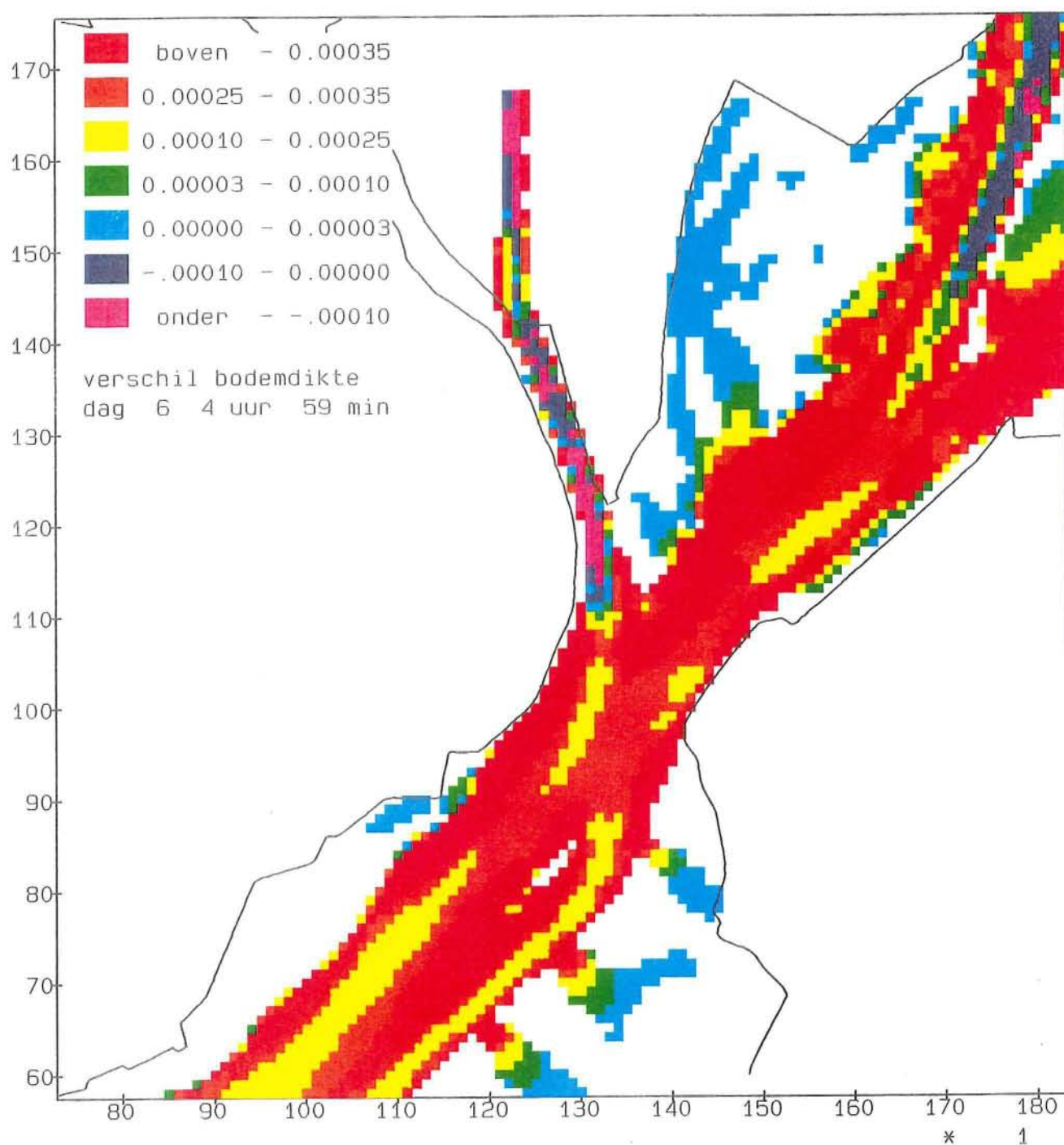
VI.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafv 3500m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

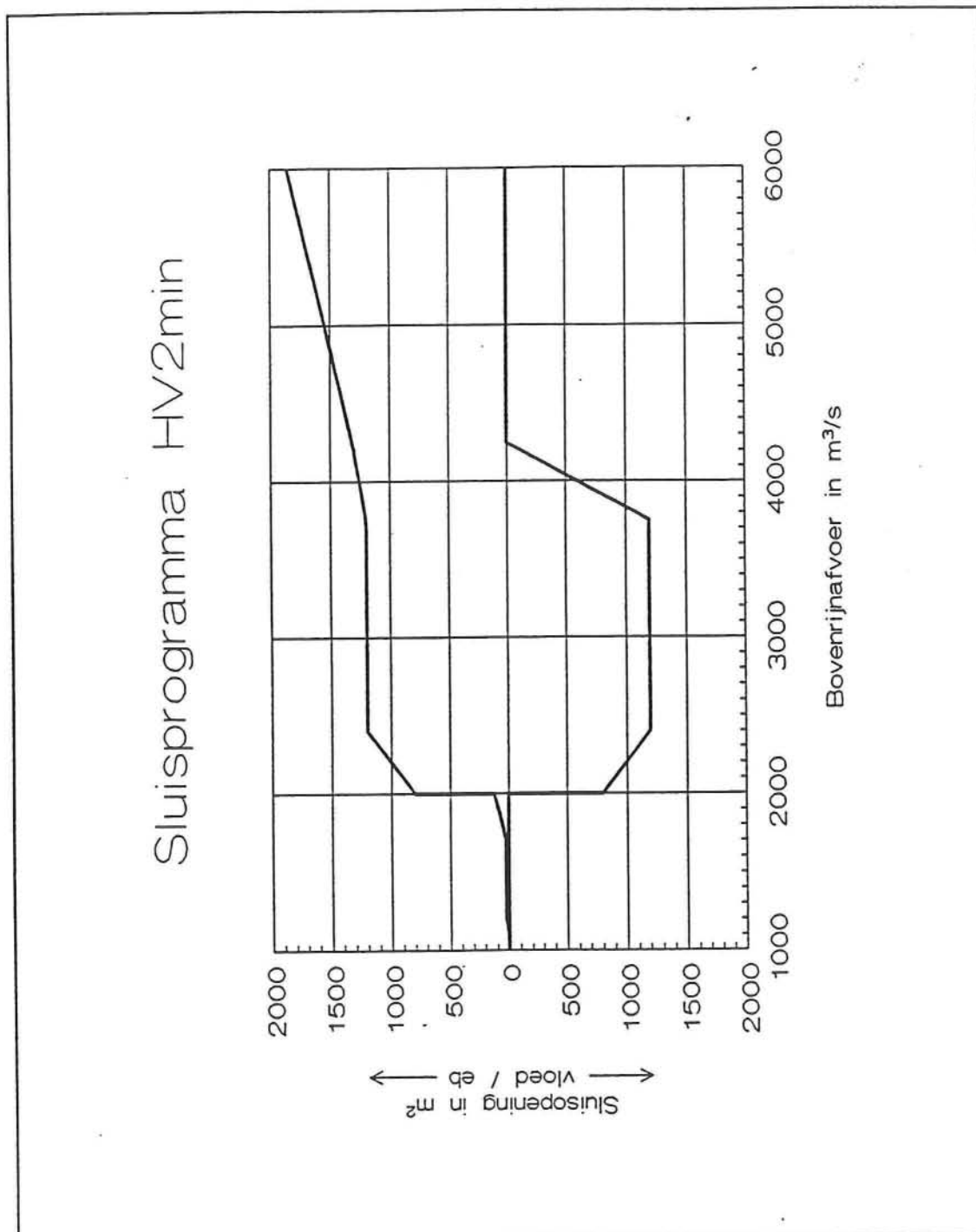
VI.1.2 Concentratie grof slib gedurende het getijde Nulalt bij Rijnafv 3500m³/s, figuur 4

Figuur 4 Tijdens vloed

VI.1.3 Mate van sedimentatie gedurende getij Nulalternatief bij Rijnafvoer 3500 m³/s



VI.2.1 Spuibeheer Haringvlietsluizen voor HV2-min variant (uit Bol, 1993)



het nieuwe bedieningsprogramma voor de Haringvlietsluizen, HV2min;
de schuifopening van de Haringvlietsluizen in relatie tot
de Bovenrijnafvoer te Lobith

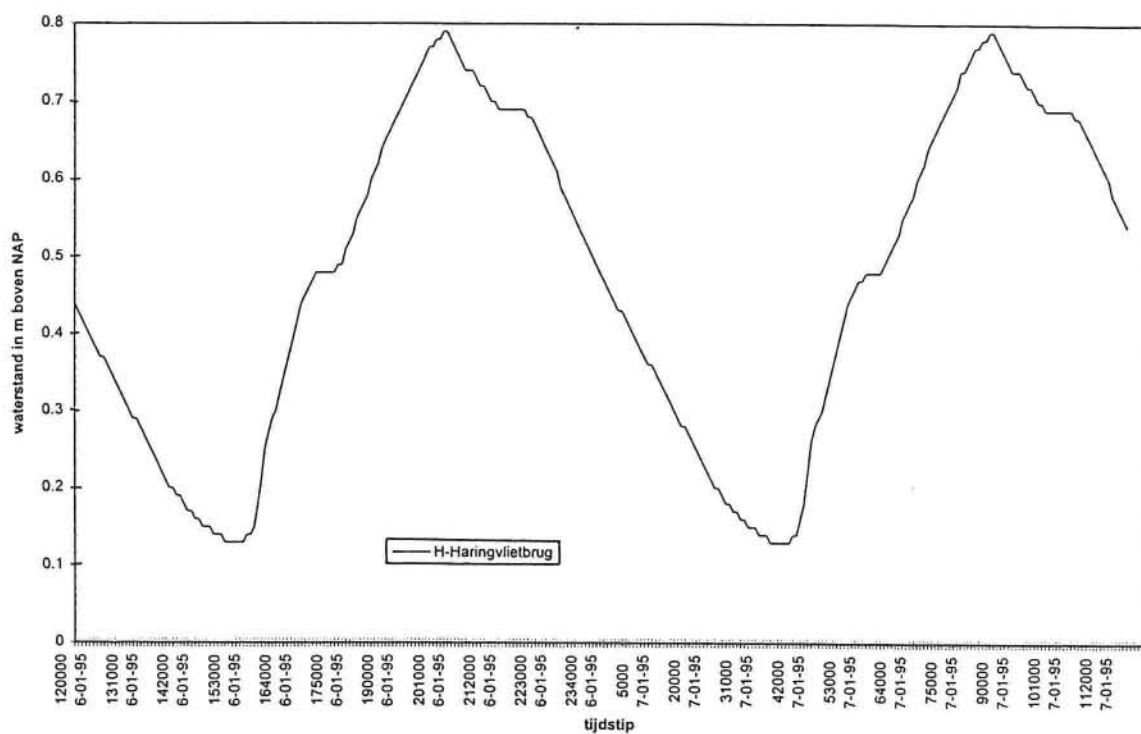
rijkswaterstaat
riza
hoofdafdeling watersystemen

RIZA nota 93.009

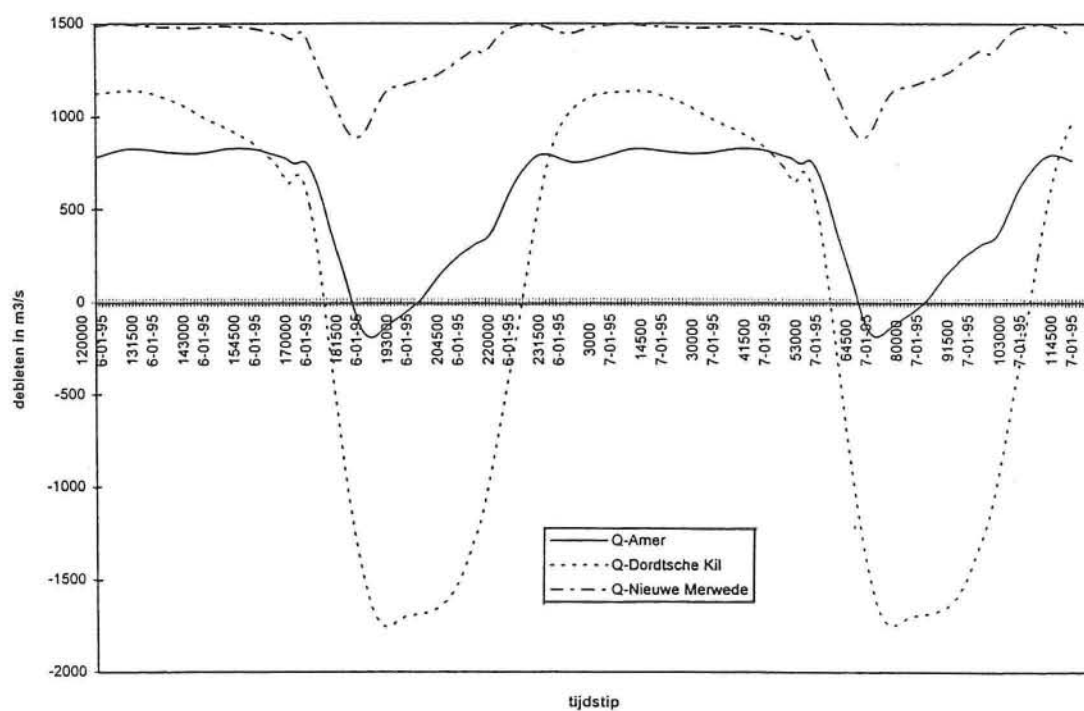
bijlage 2.1

VI.2.2 Randvoorwaarden WAQUA voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s

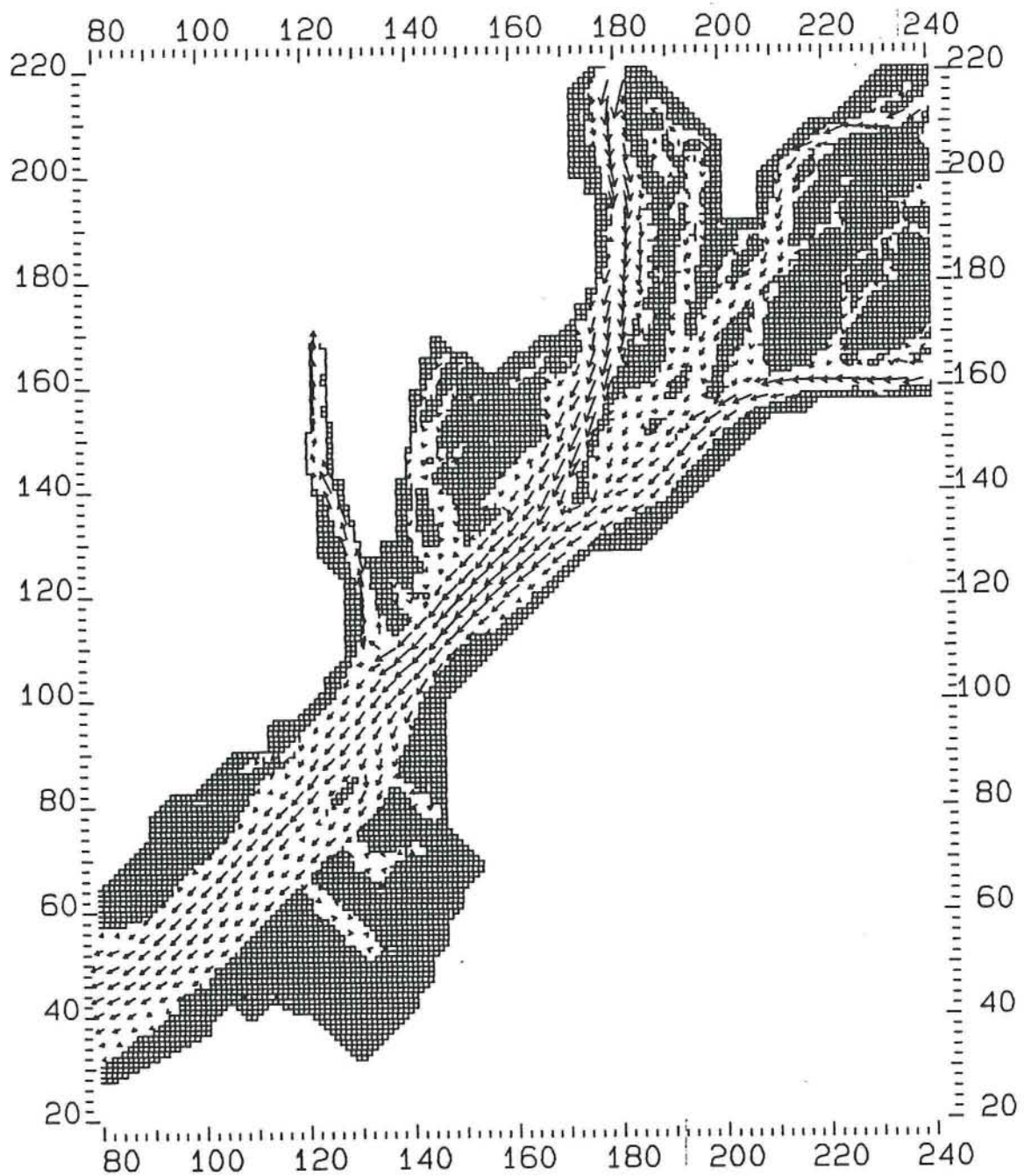
Randvoorwaarde HV2-min variant waterstand Haringvlietbrug



Randvoorwaarden HV2-min variant debieten

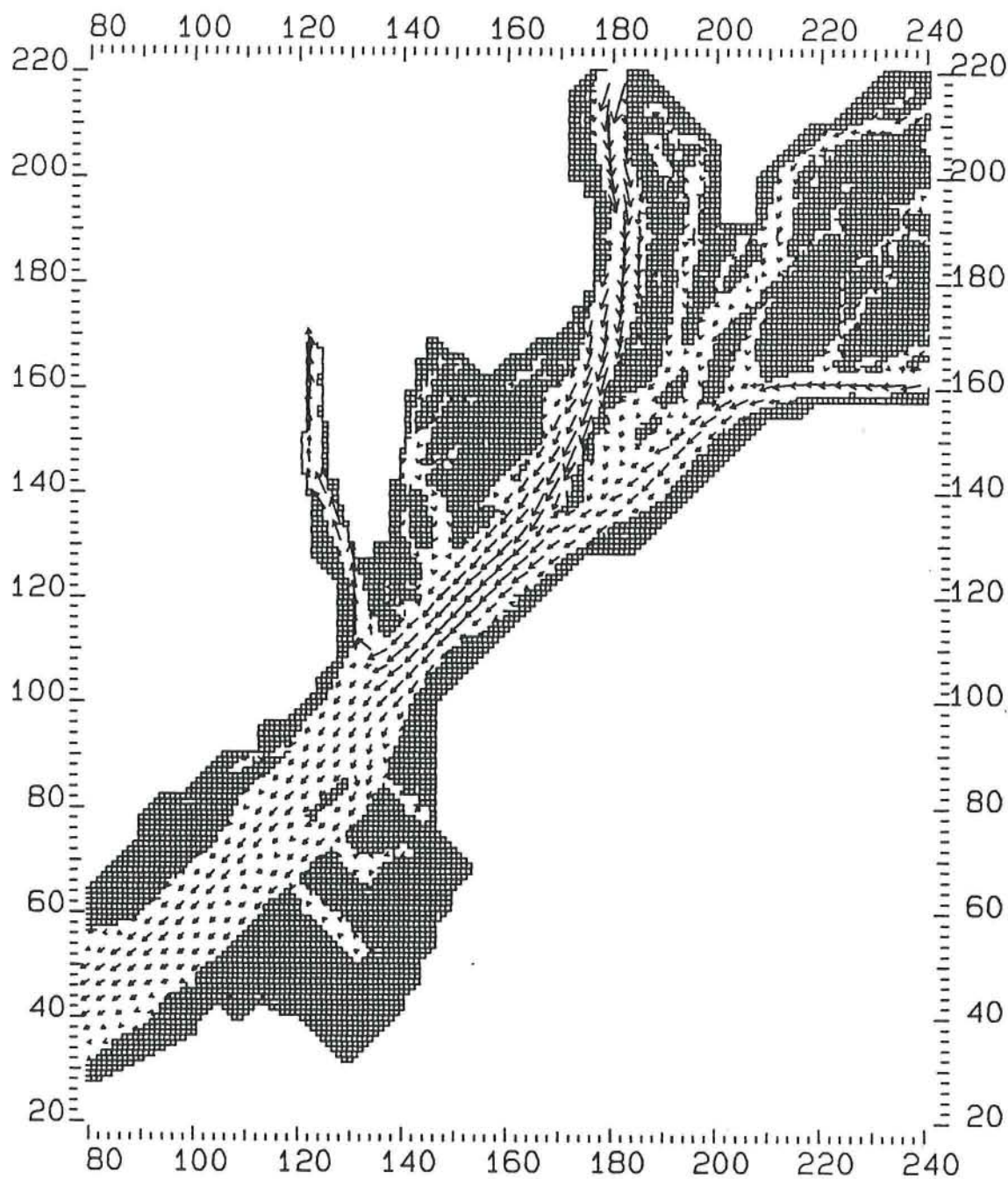


VI.2.3 Stroombeeld voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s, figuur 1

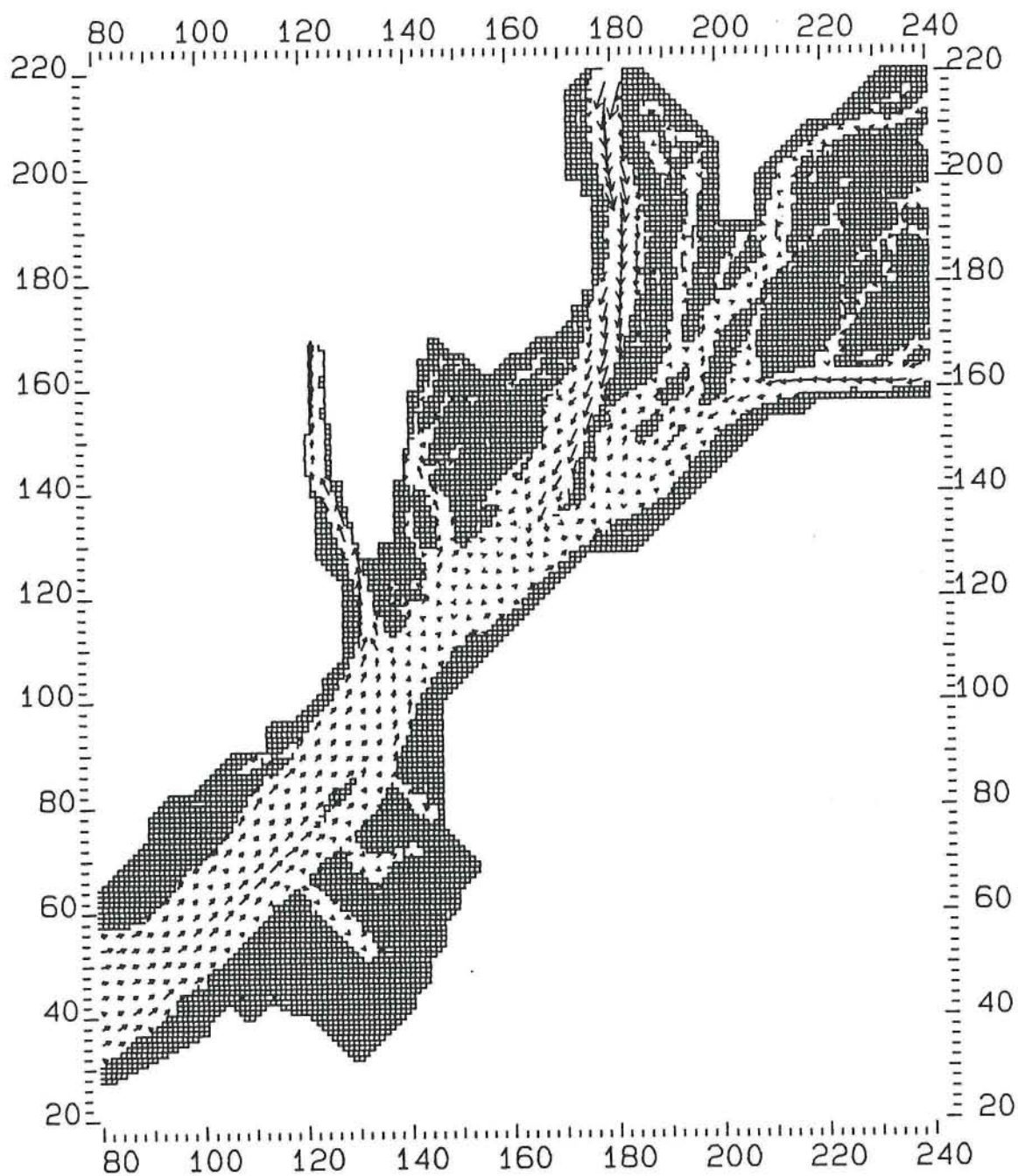


Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

VI.2.3 Stroombeeld voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s, figuur 2

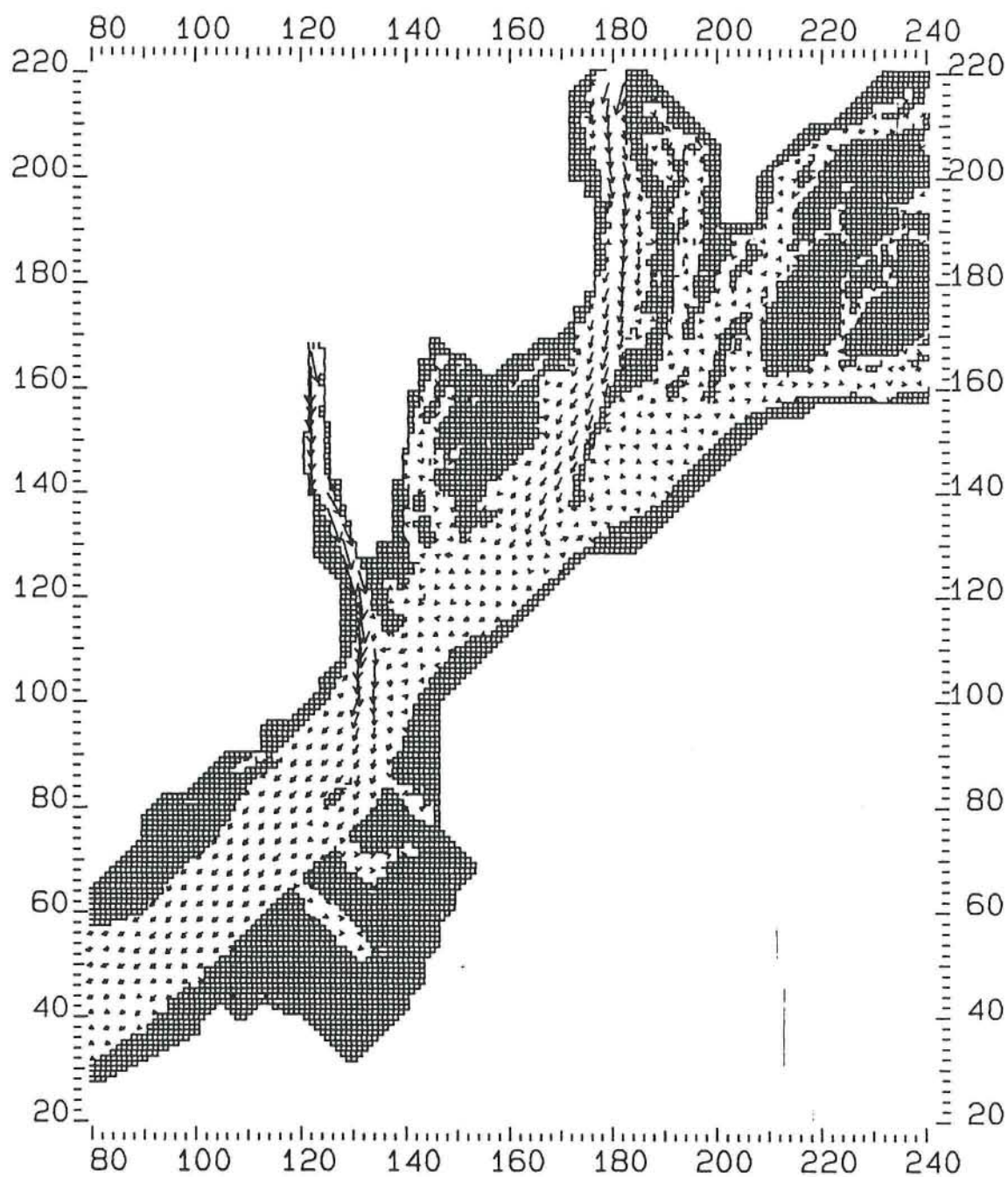


Figuur 2 Tijdens eb

VI.2.3 Stroombeeld voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

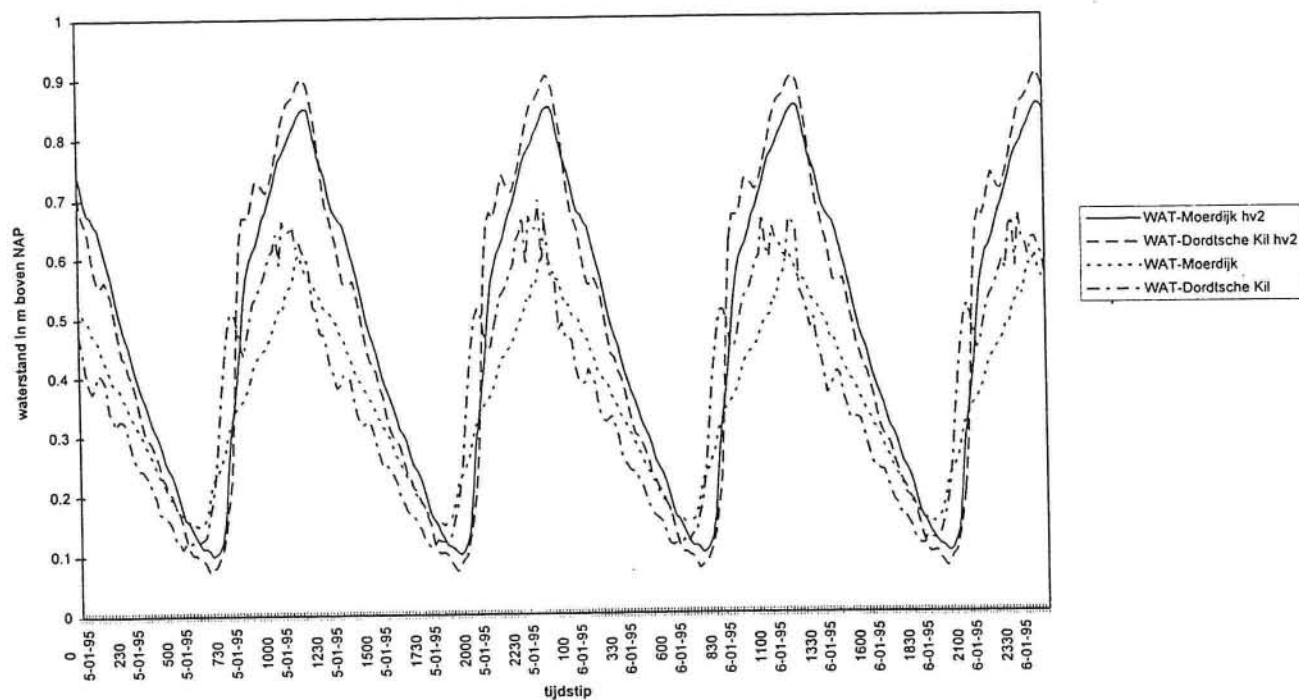
VI.2.3 Stroombeeld voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s, figuur 4



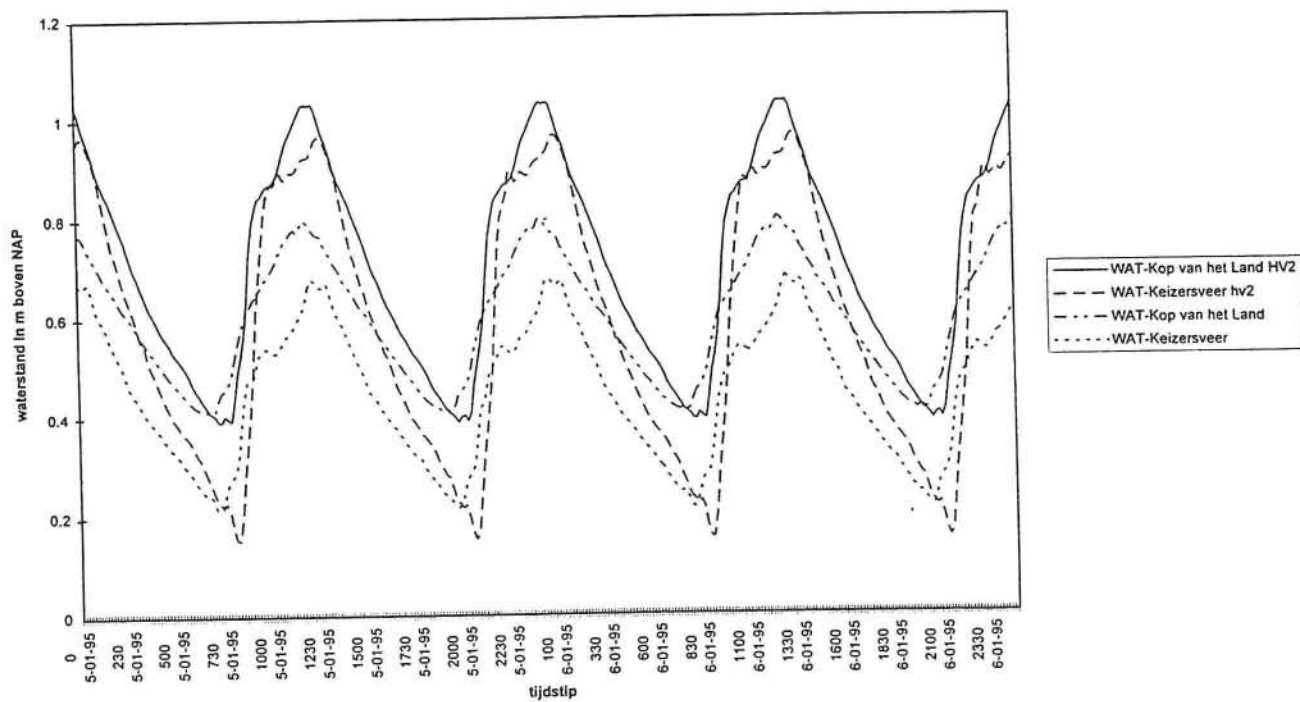
Figuur 4 Tijdens vloed

VI.2.4 Waterbeweging voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s

Waterstanden HV2-min variant 3500

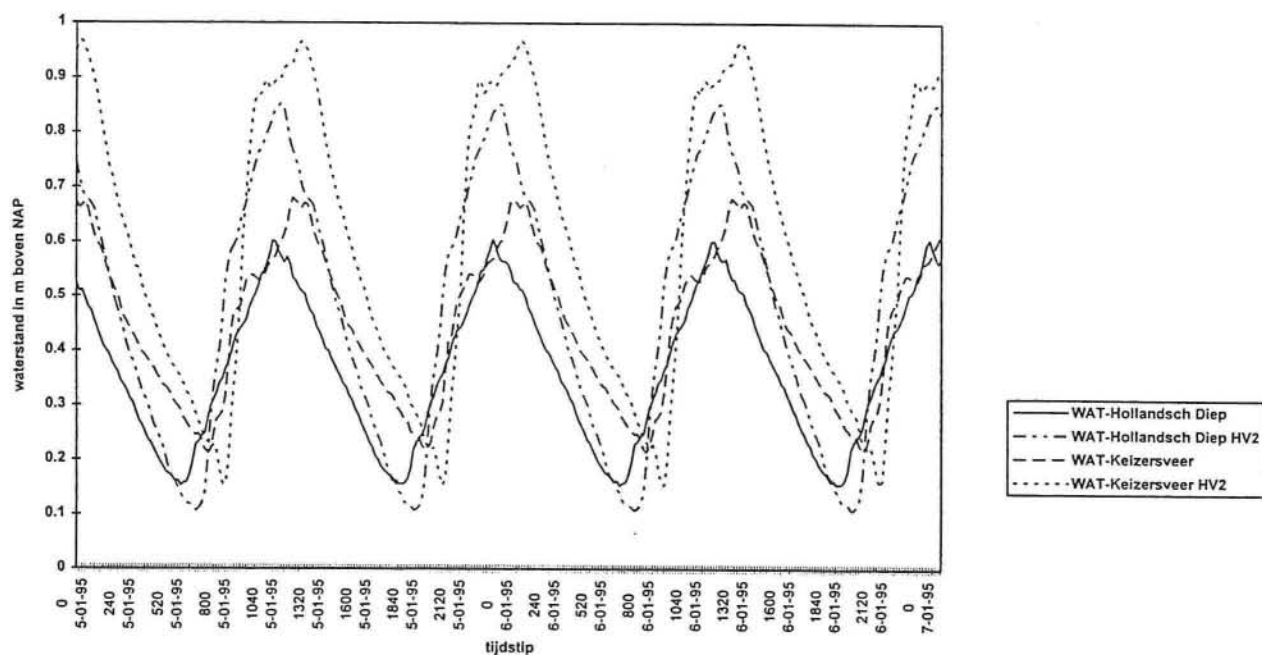


Waterstanden hv2-variant 3500

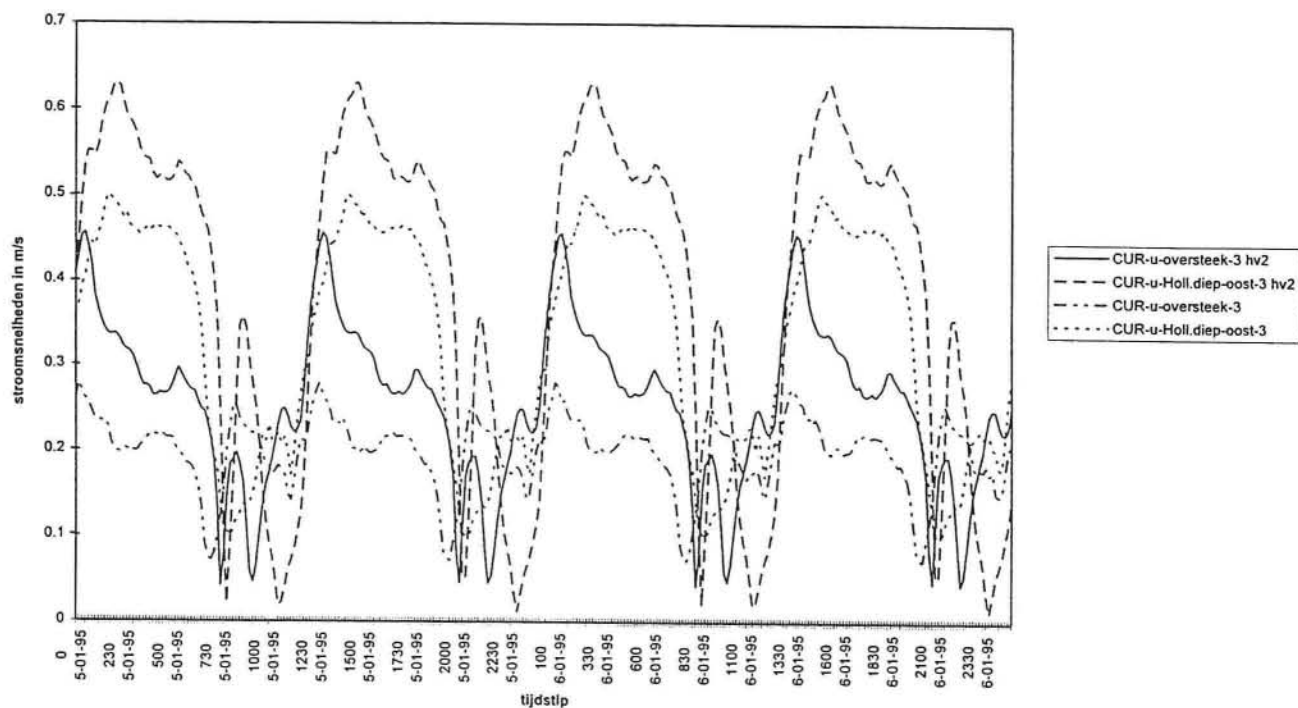


VI.2.4 Waterbeweging voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s, vervolg

Waterstanden bij Rijnafvoer van 3500 m³/s

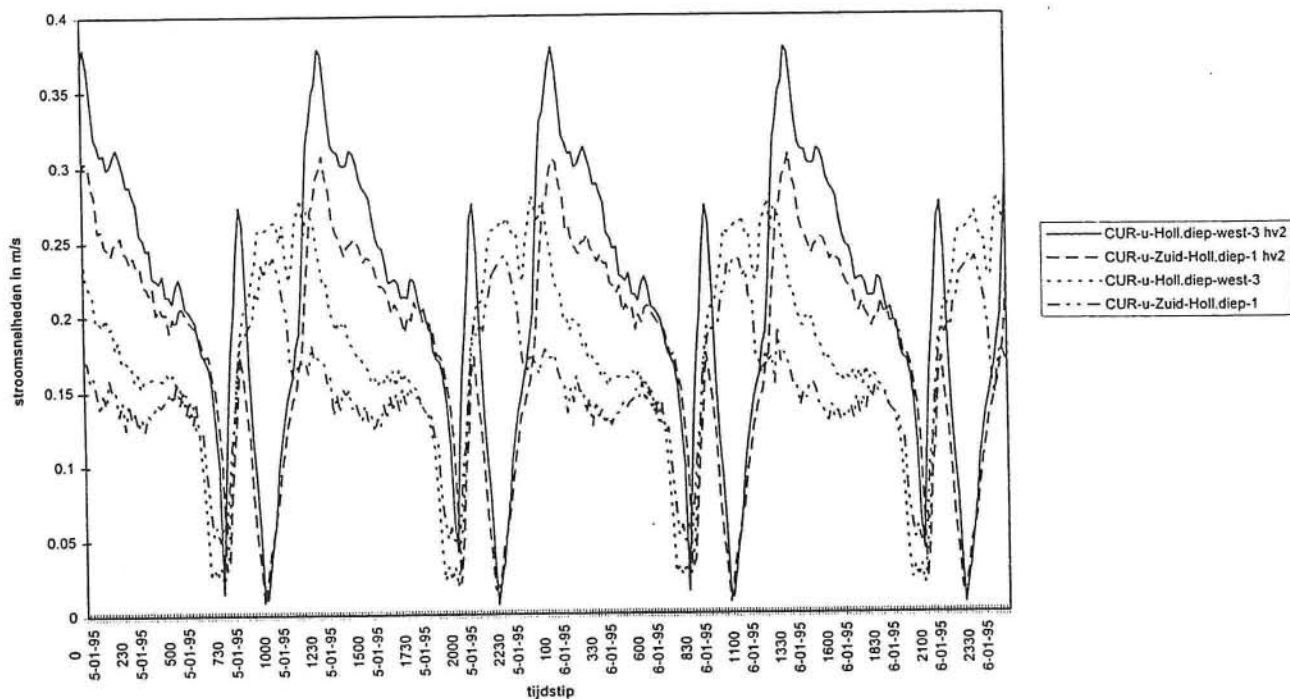


Stroomsnelheden bij hv2-min variant

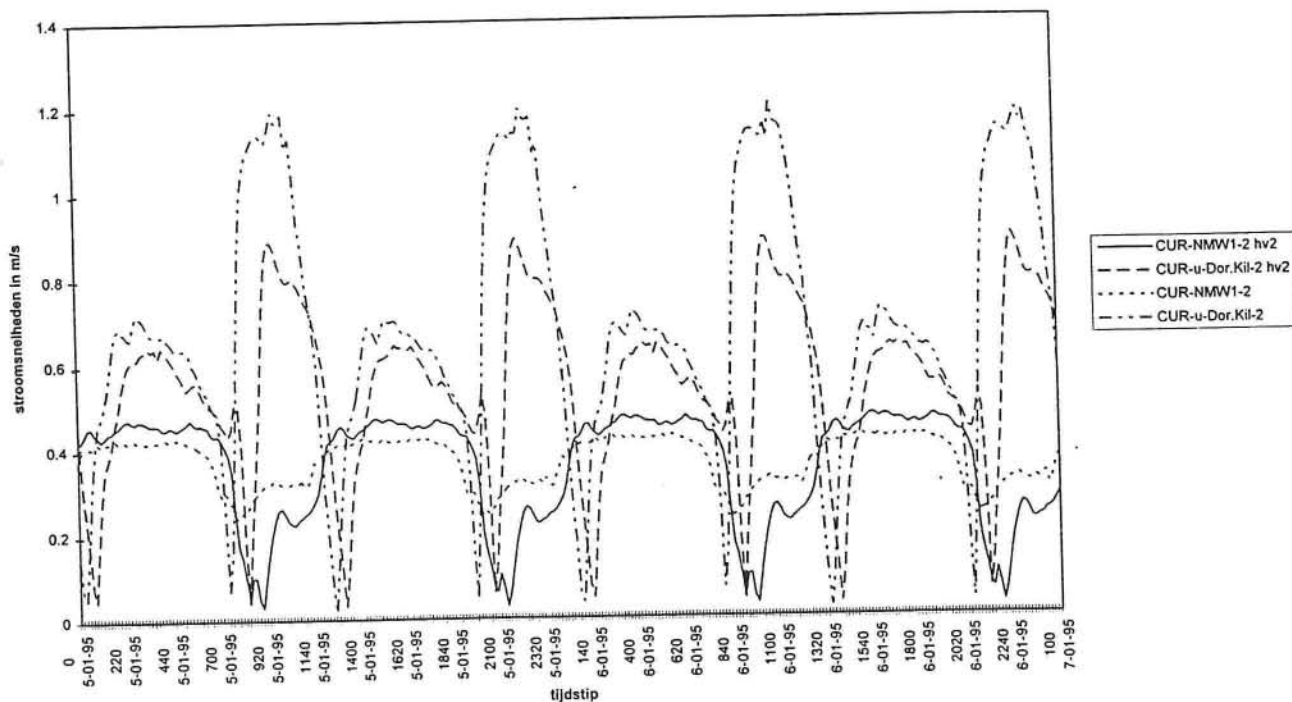


VI.2.4 Waterbeweging voor HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s, vervolg

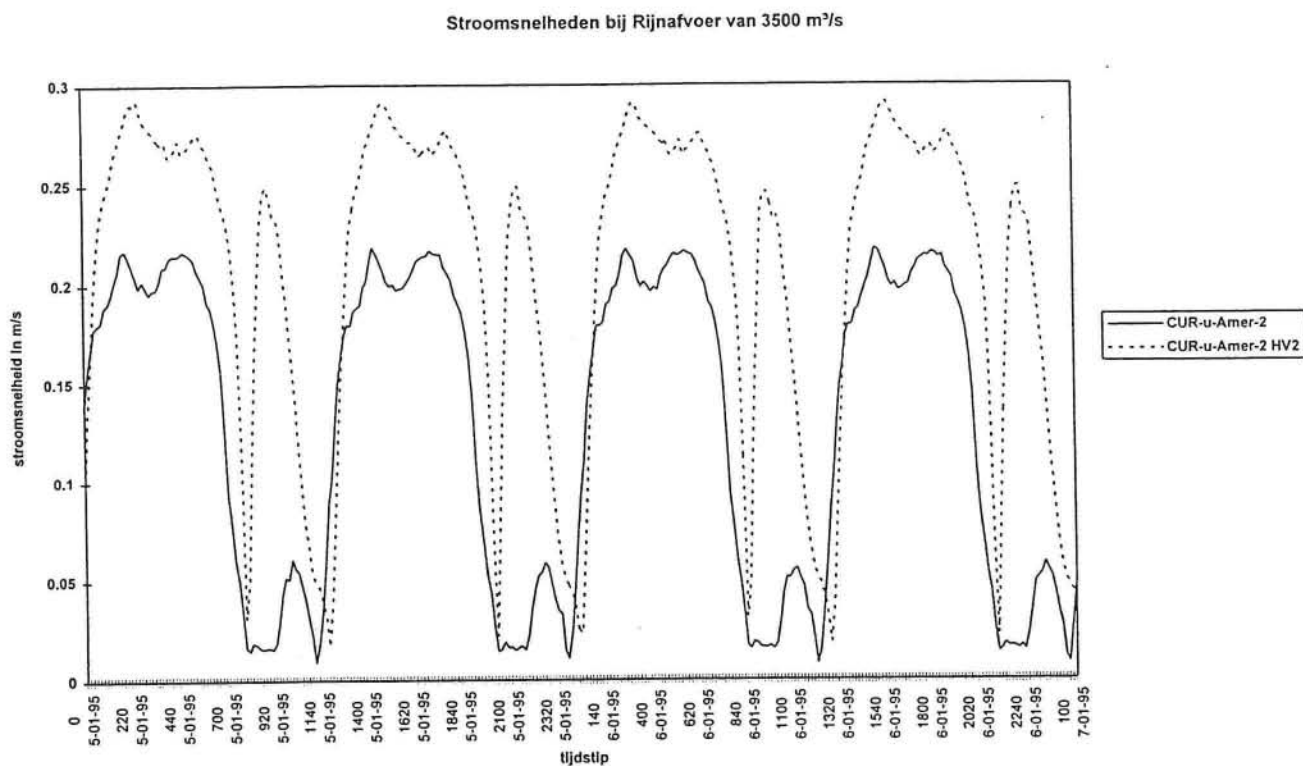
Stroomsnelheden bij hv2-min variant



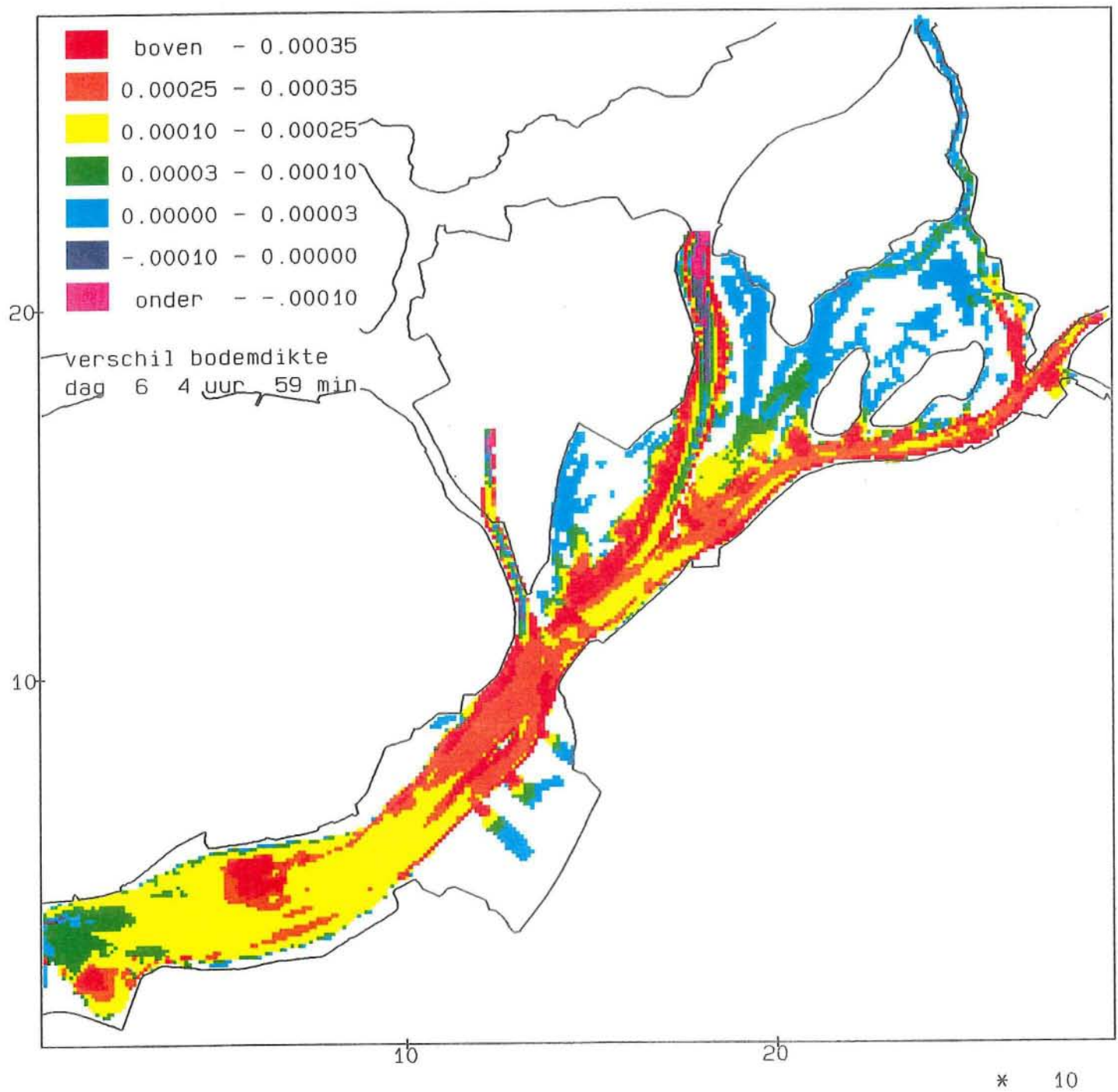
Stroomsnelheden bij hv2-min variant

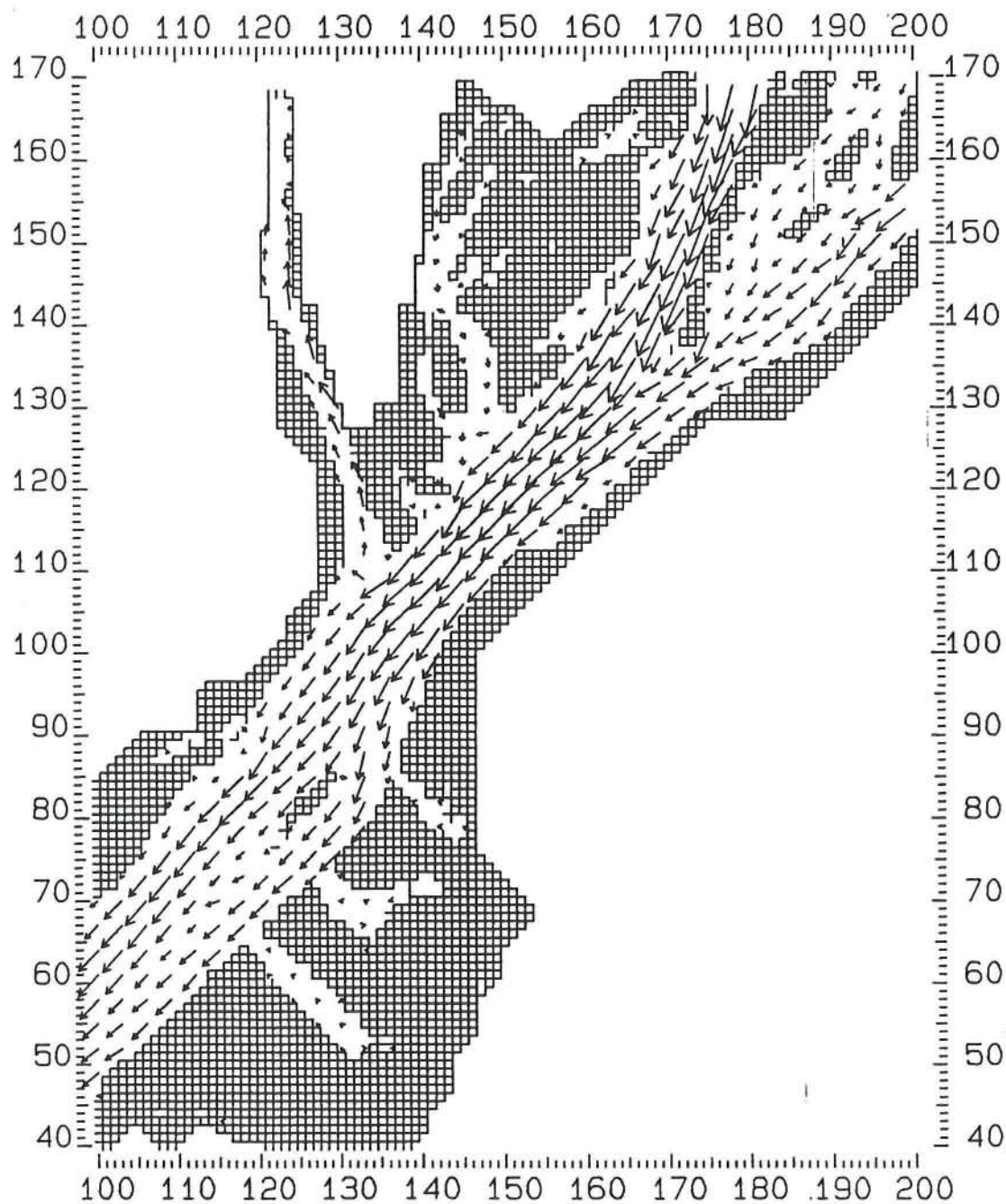


VI.2.4 Waterbeweging voor HV2-min variant bij Rijnafoer 3500 m³/s, vervolg



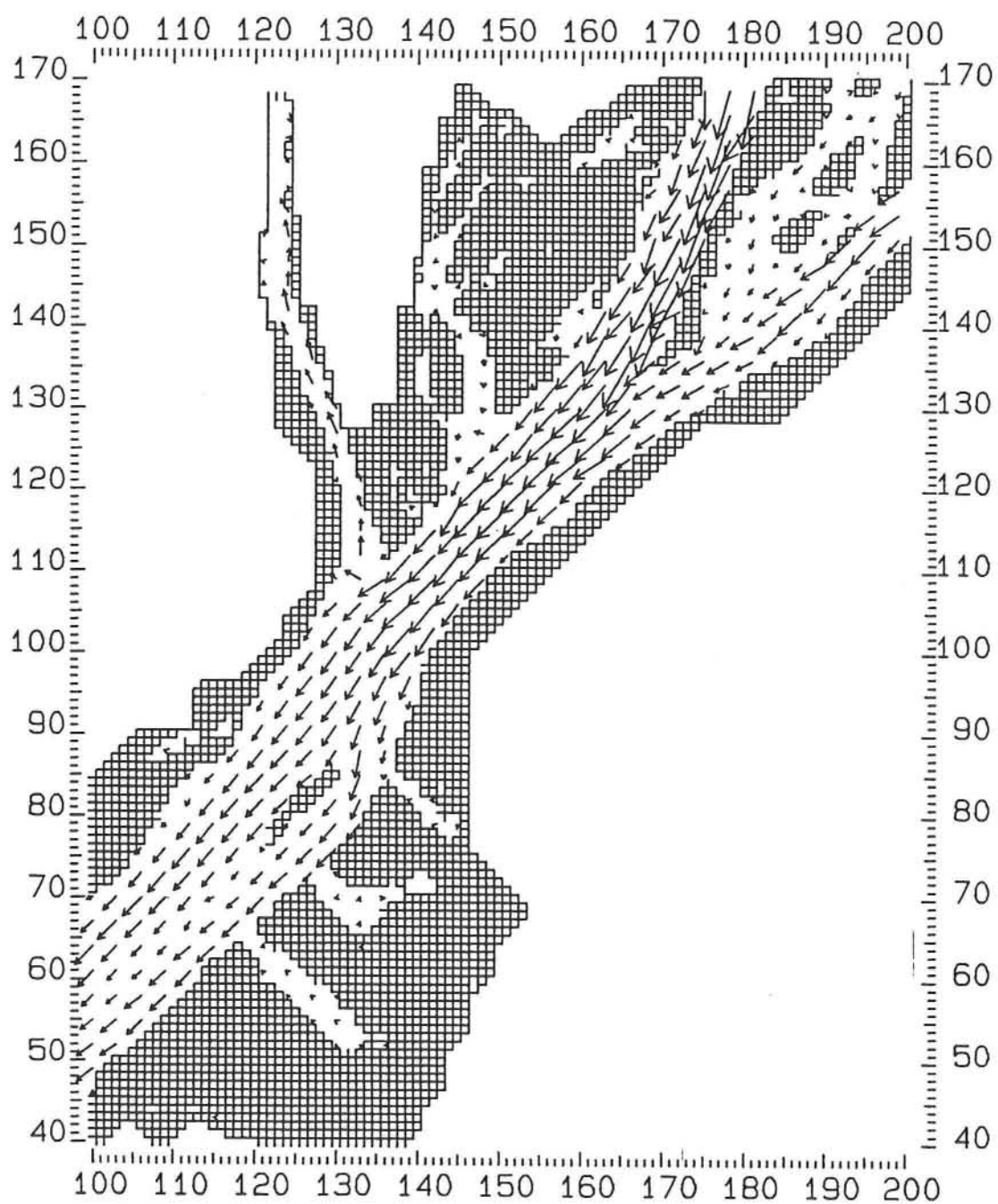
VI.2.5 Sedimentatie HV2-min variant bij Rijnafvoer 3500 m³/s



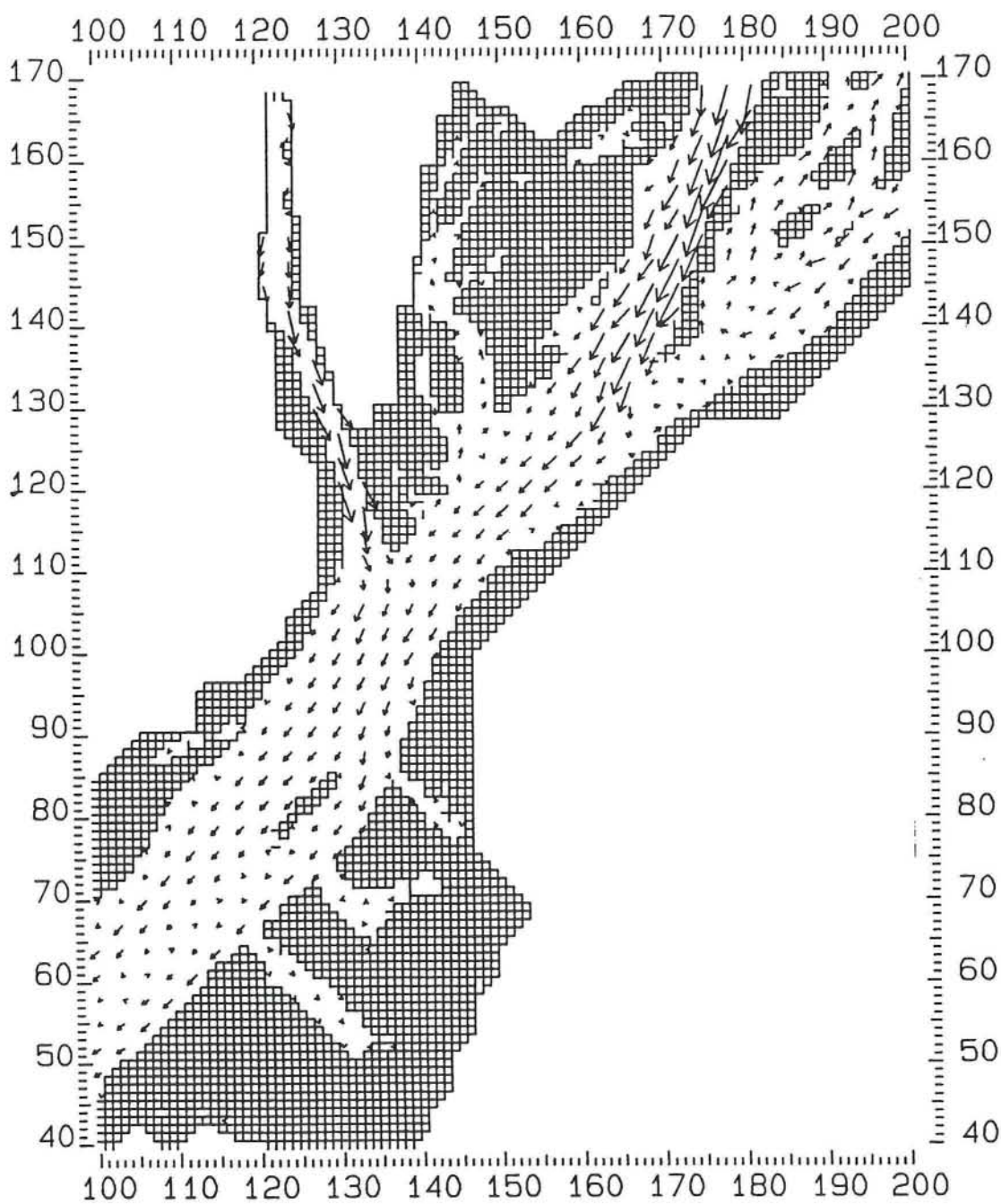
Bijlage VII Resultaten Rijnafvoer 5000 m³/s**VII.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 1**

Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

VII.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 2

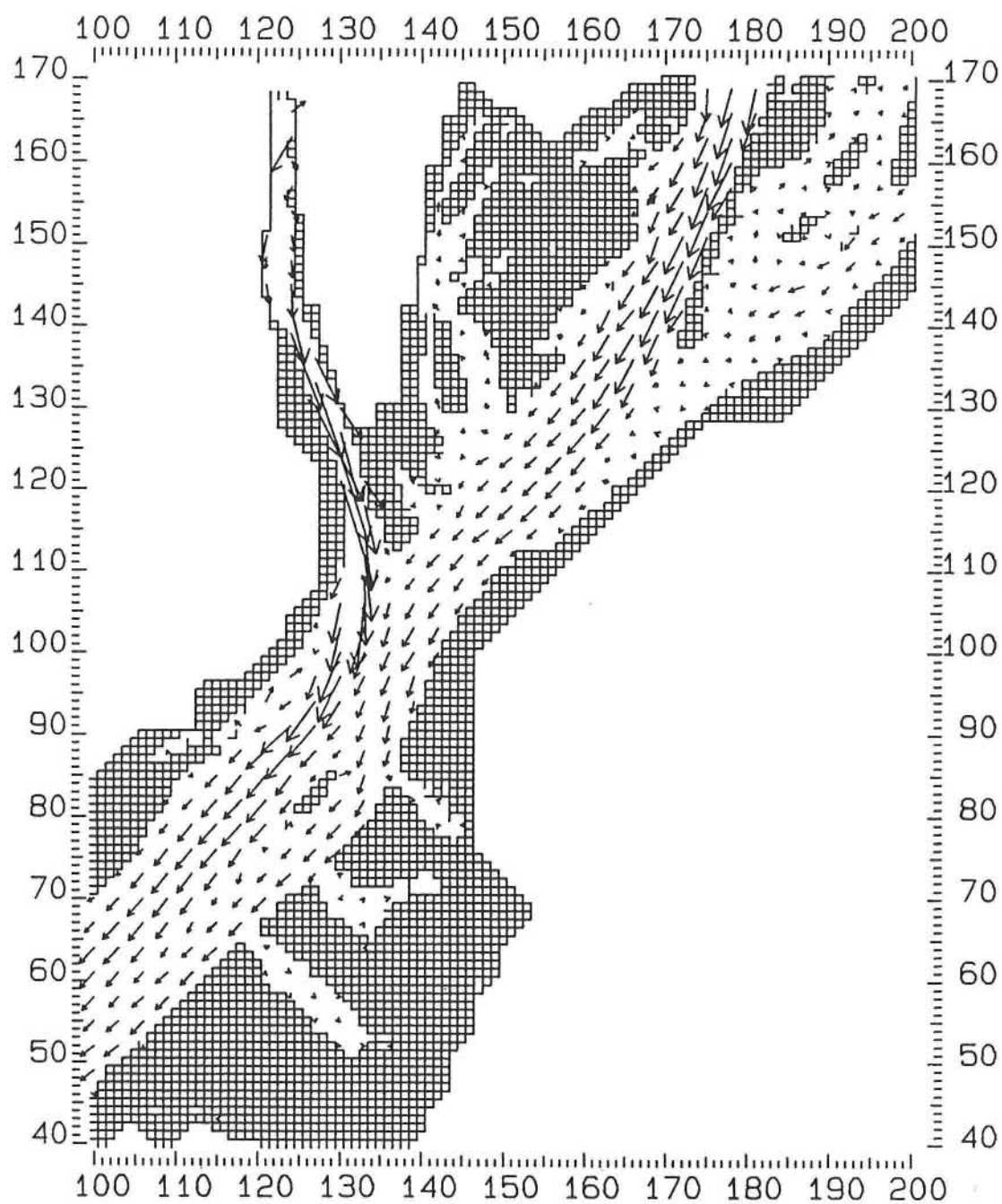


Figuur 2 Tijdens eb

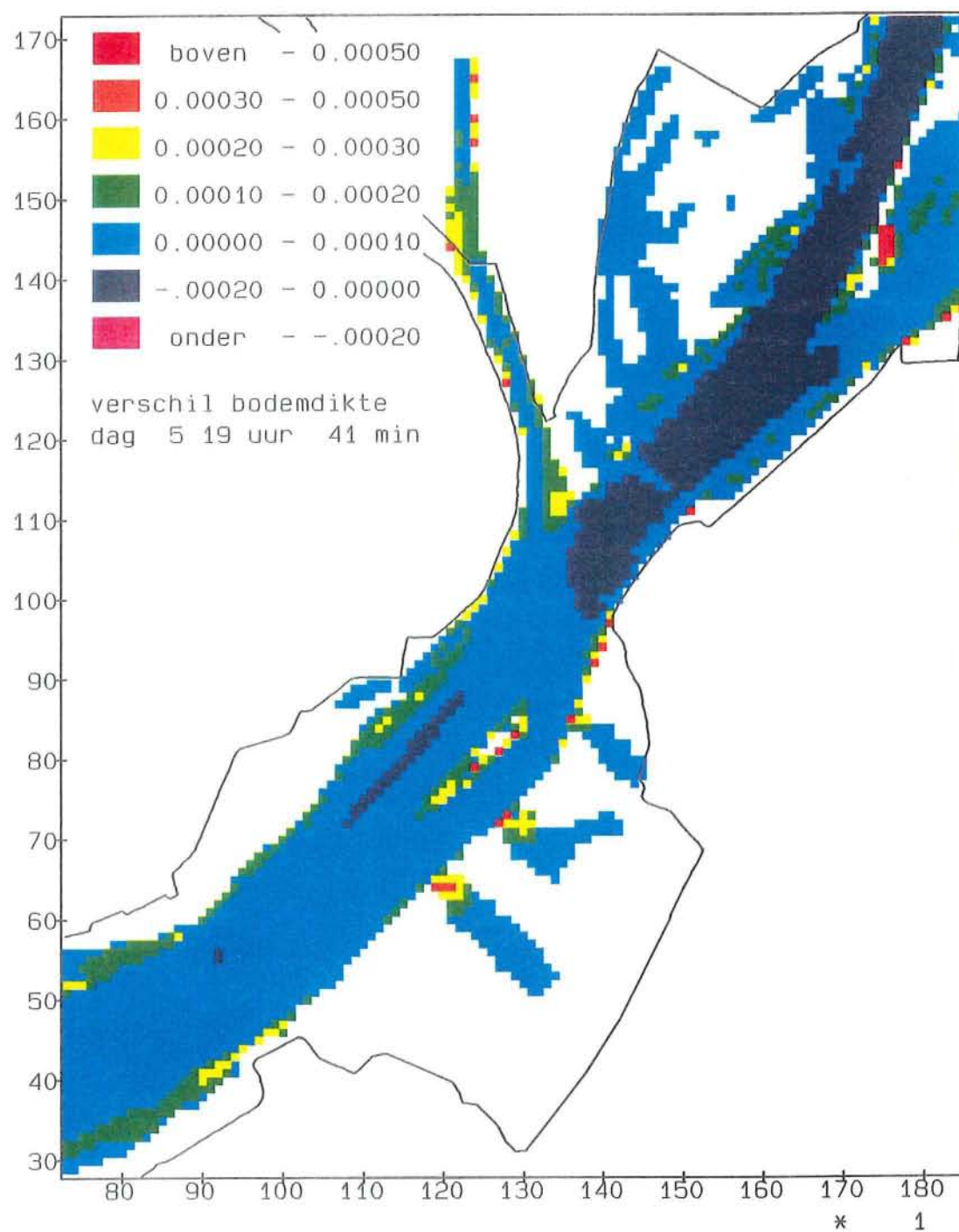
VII.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

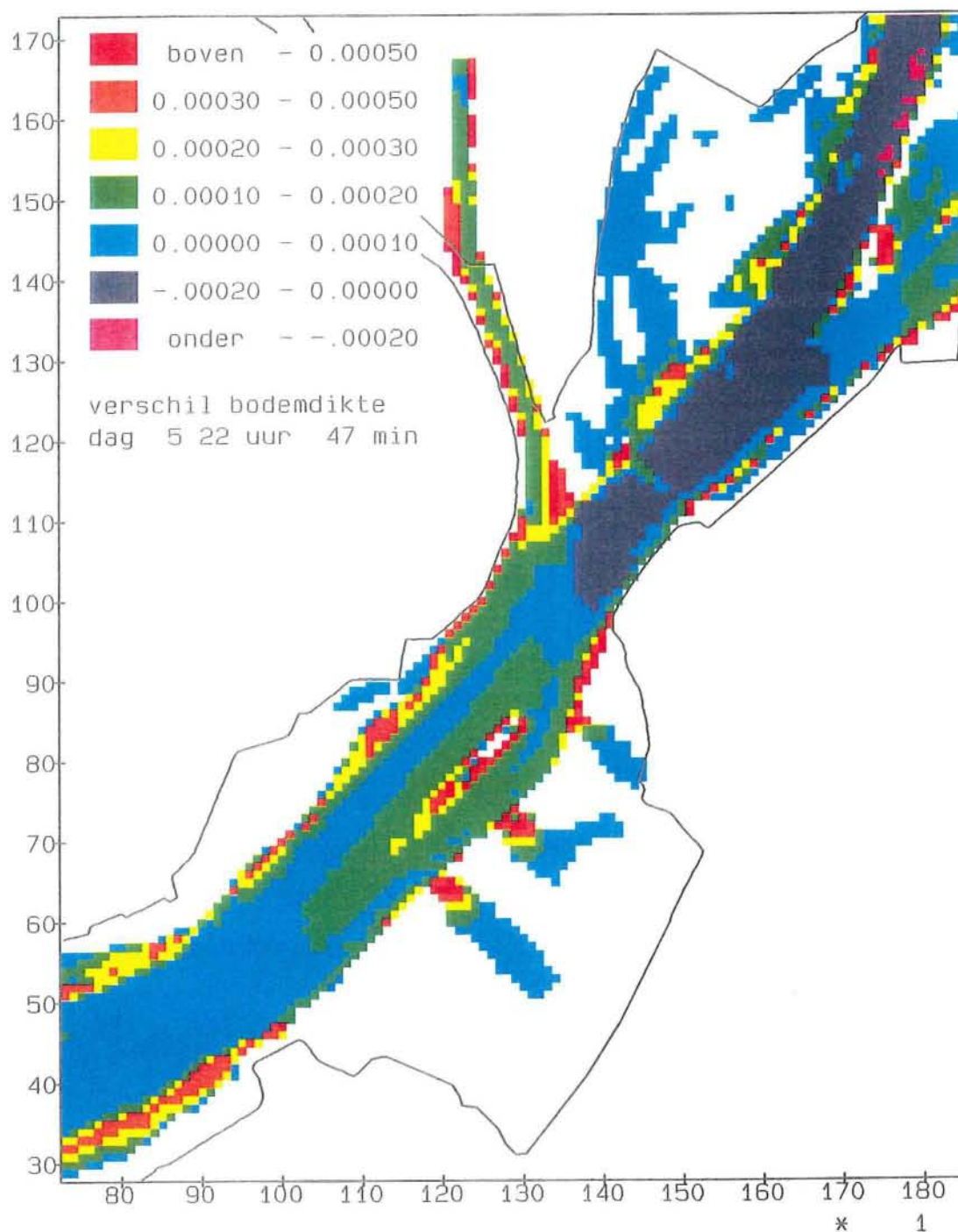
VII.1.1 Stroombeeld Nulalternatief bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 4



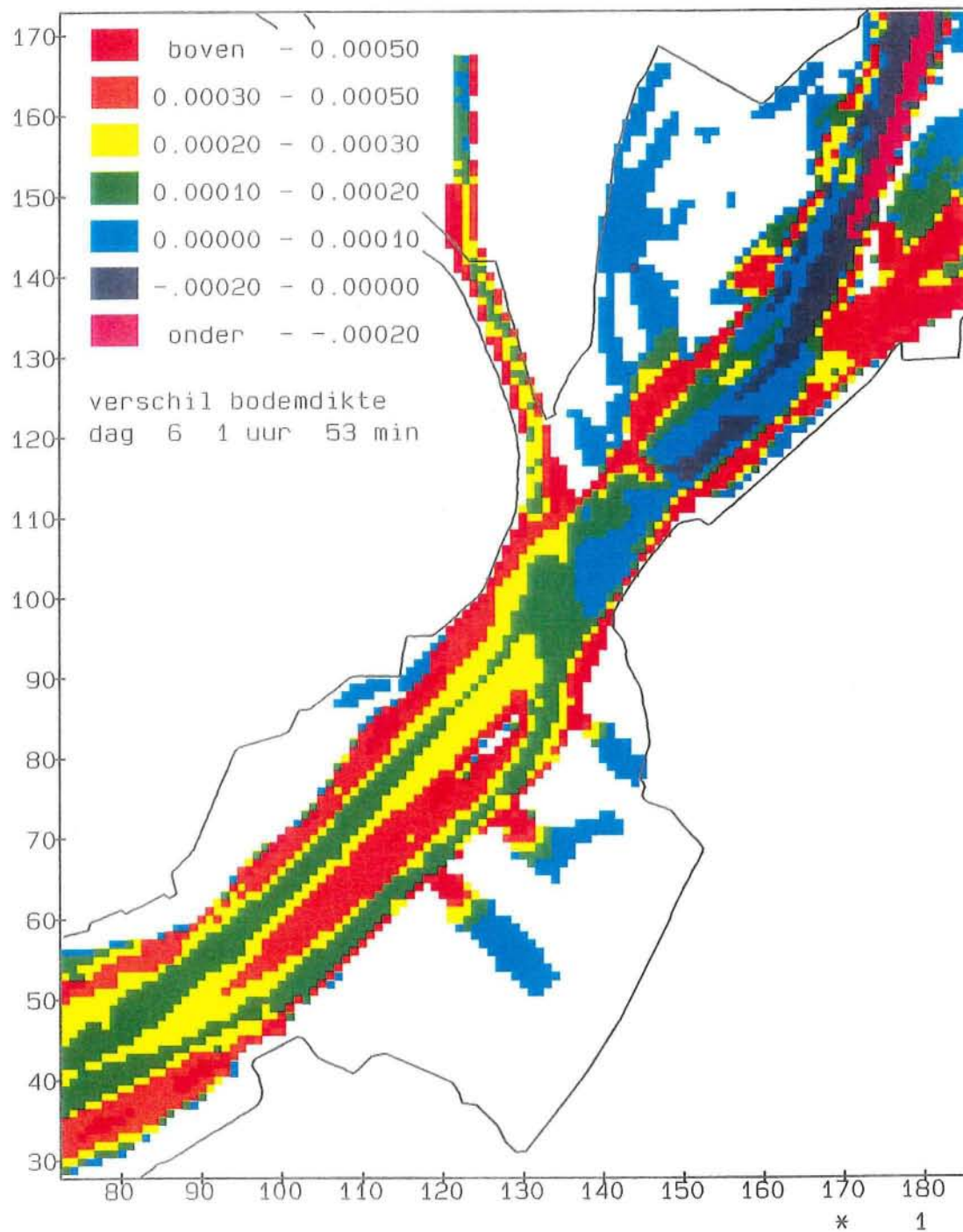
Figuur 4 Tijdens vloed

VII.1.2 Sedimentatieverloop gedurende het getijde bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 1

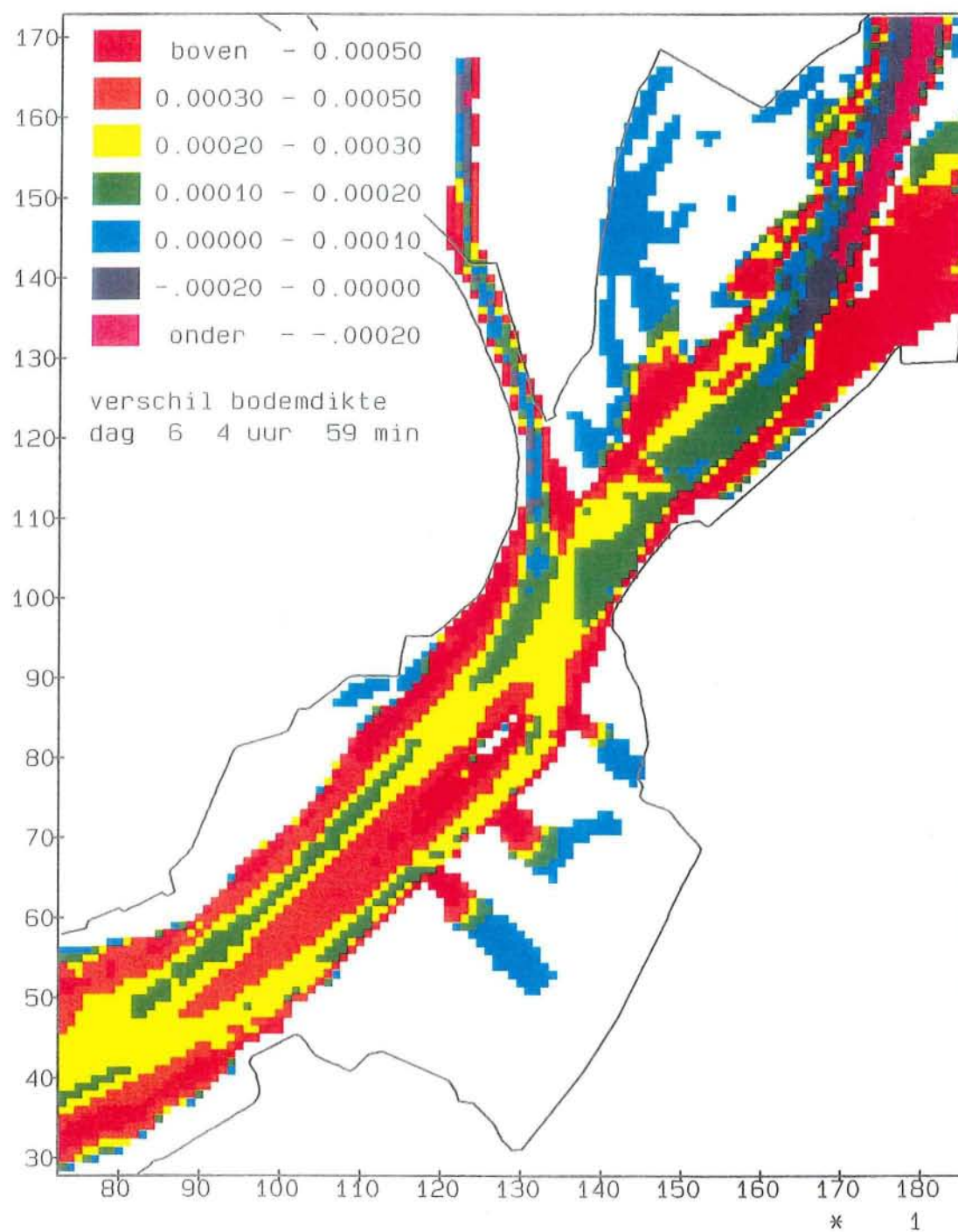
Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

VII.1.2 Sedimentatieverloop gedurende het getijde bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 2

Figuur 2 Tijdens eb

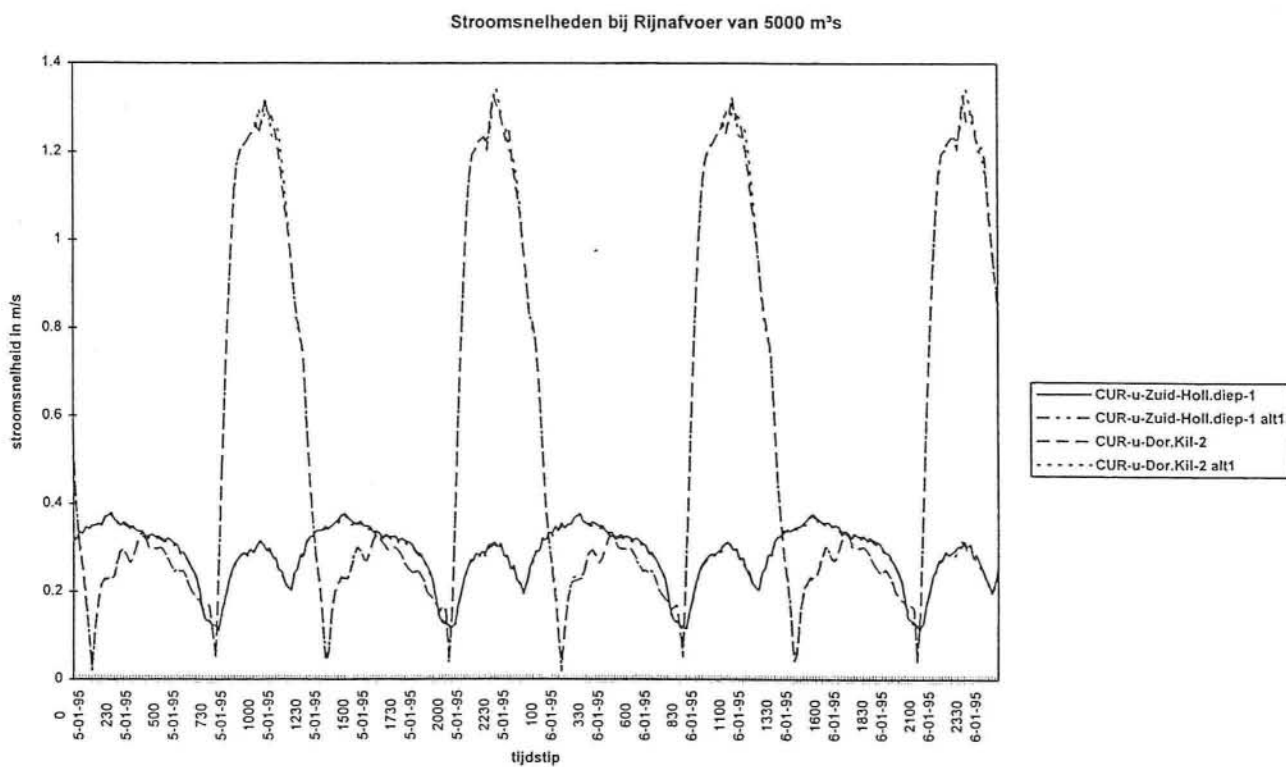
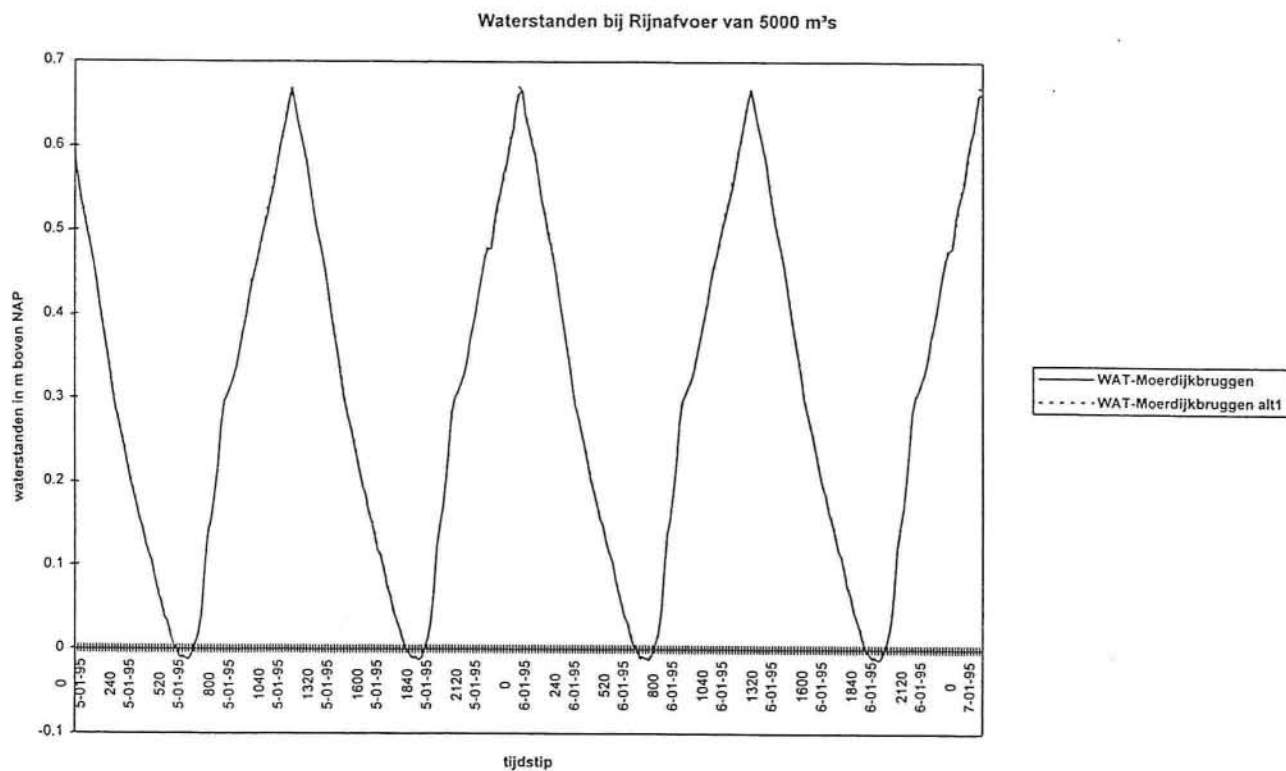
VII.1.2 Sedimentatieverloop gedurende het getijde bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

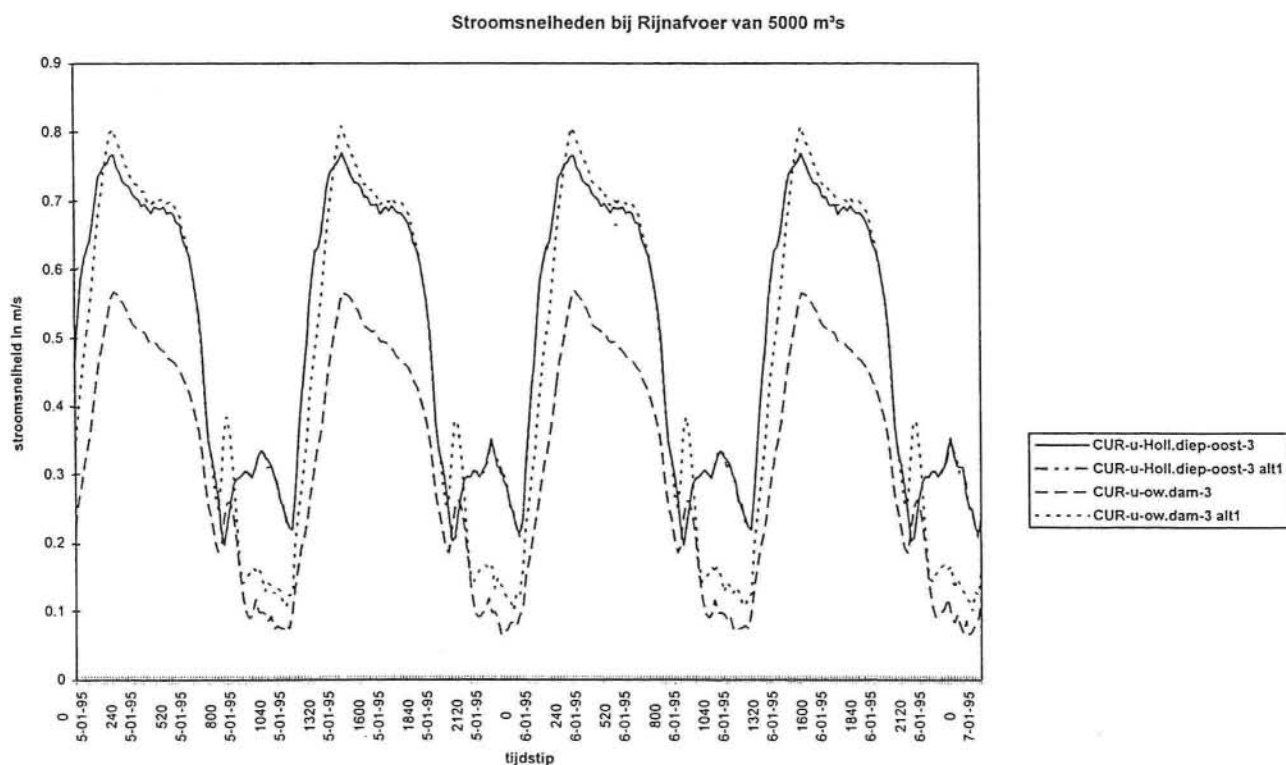
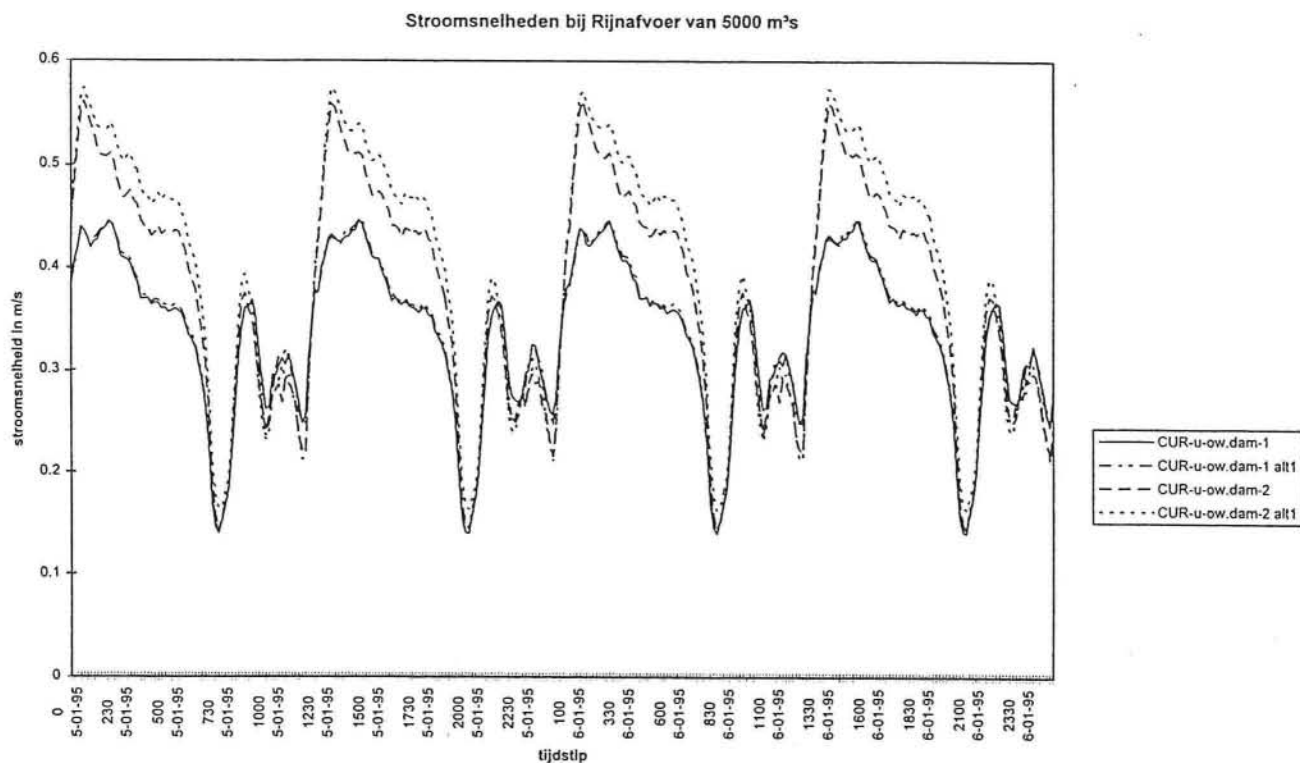
VII.1.2 Sedimentatieverloop gedurende het getijde bij Rijnafvoer 5000 m³/s, figuur 4

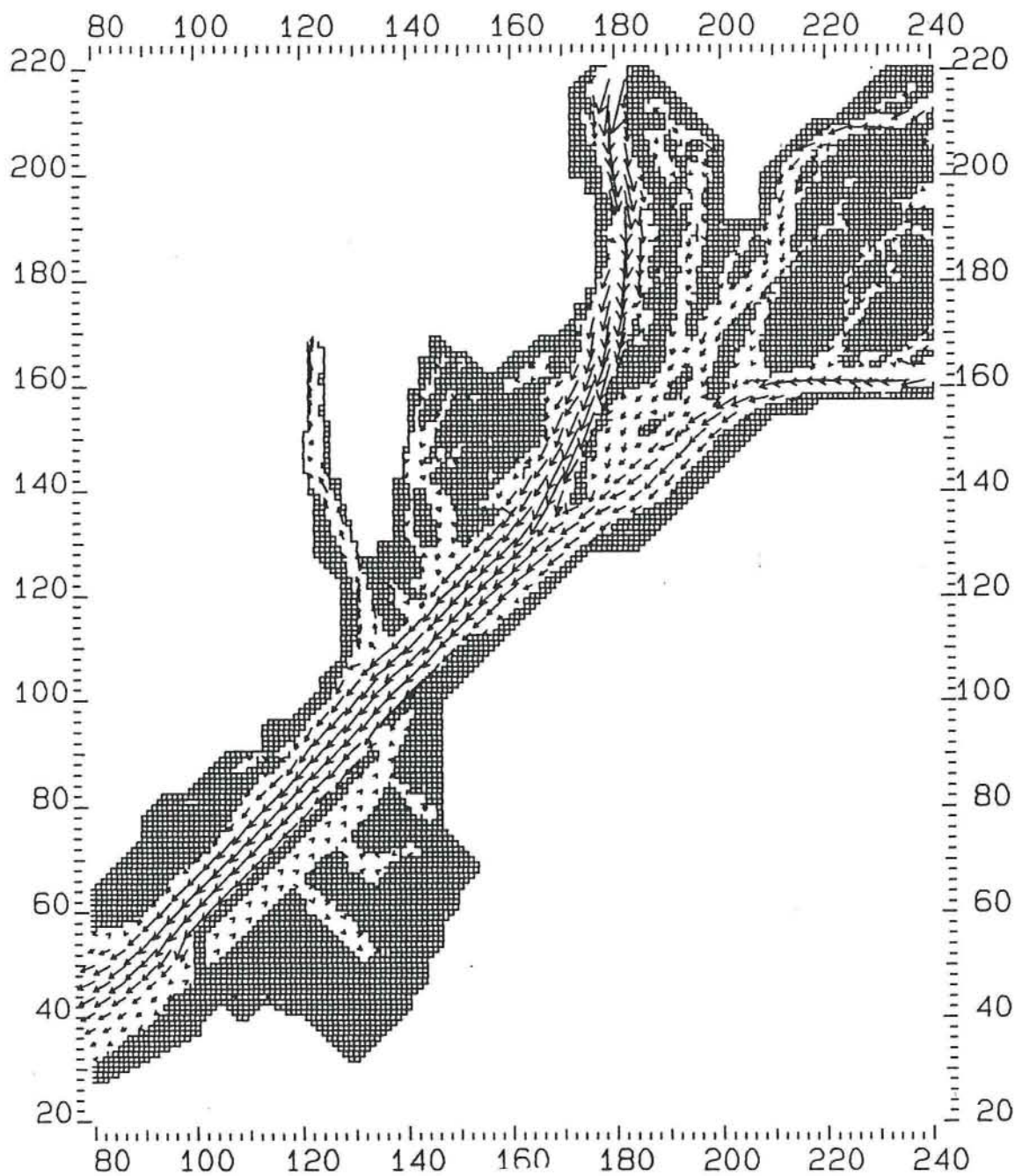
Figuur 4 Tijdens vloed

VII.3.1 Waterbeweging alternatief 1: onderwaterdam, bij Rijnafvoer 5000 m³/s



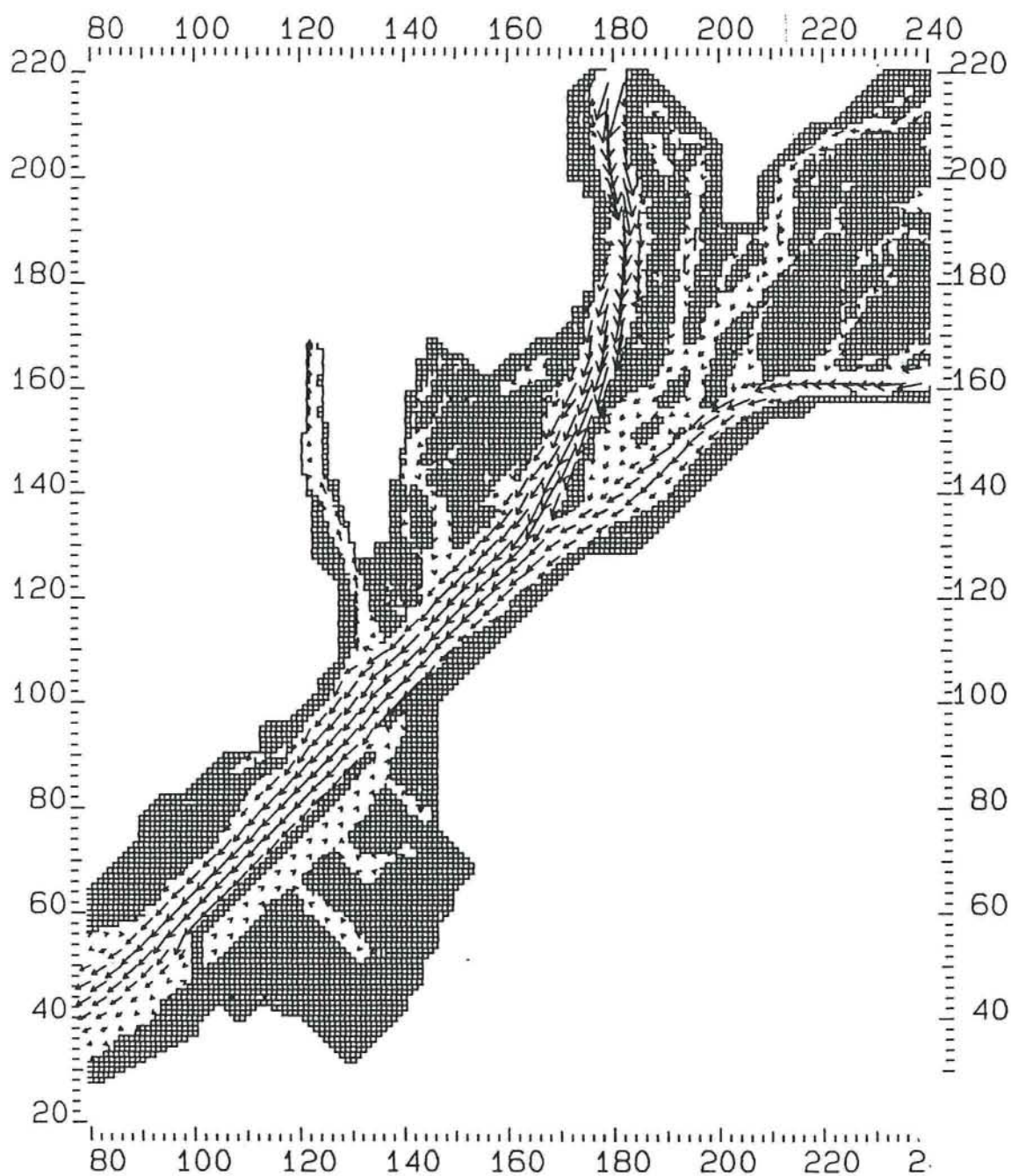
VII.3.1 Waterbeweging alternatief 1: onderwaterdam, bij Rijnafoer 5000 m³/s, vervolg



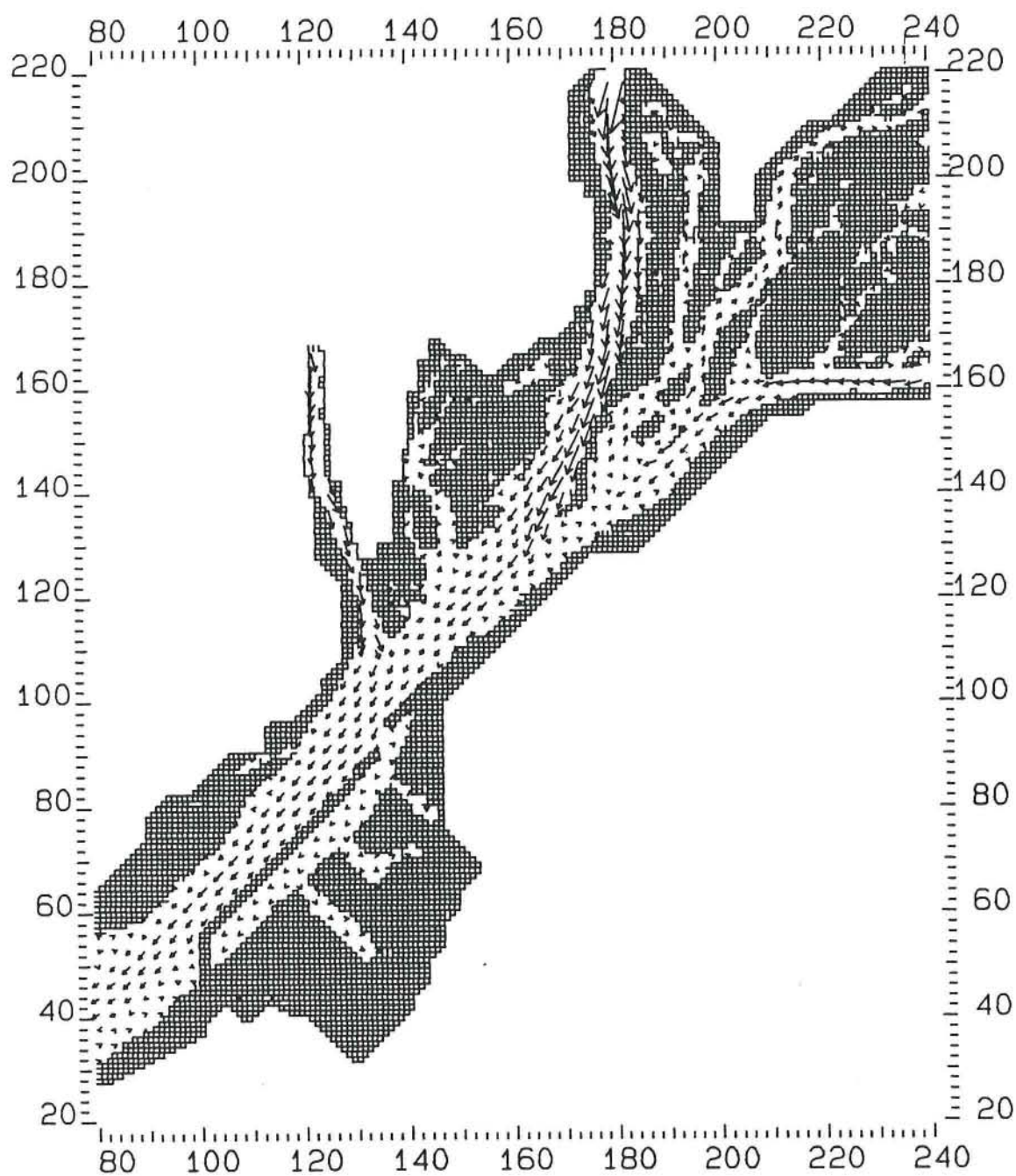
VII.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting, bij Rijnafvoer 5000m³/s,fig 1

Figuur 1 Tussen vloed en eb/ ebstroom

VII.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting, bij Rijnafvoer 5000m³/s, fig 2

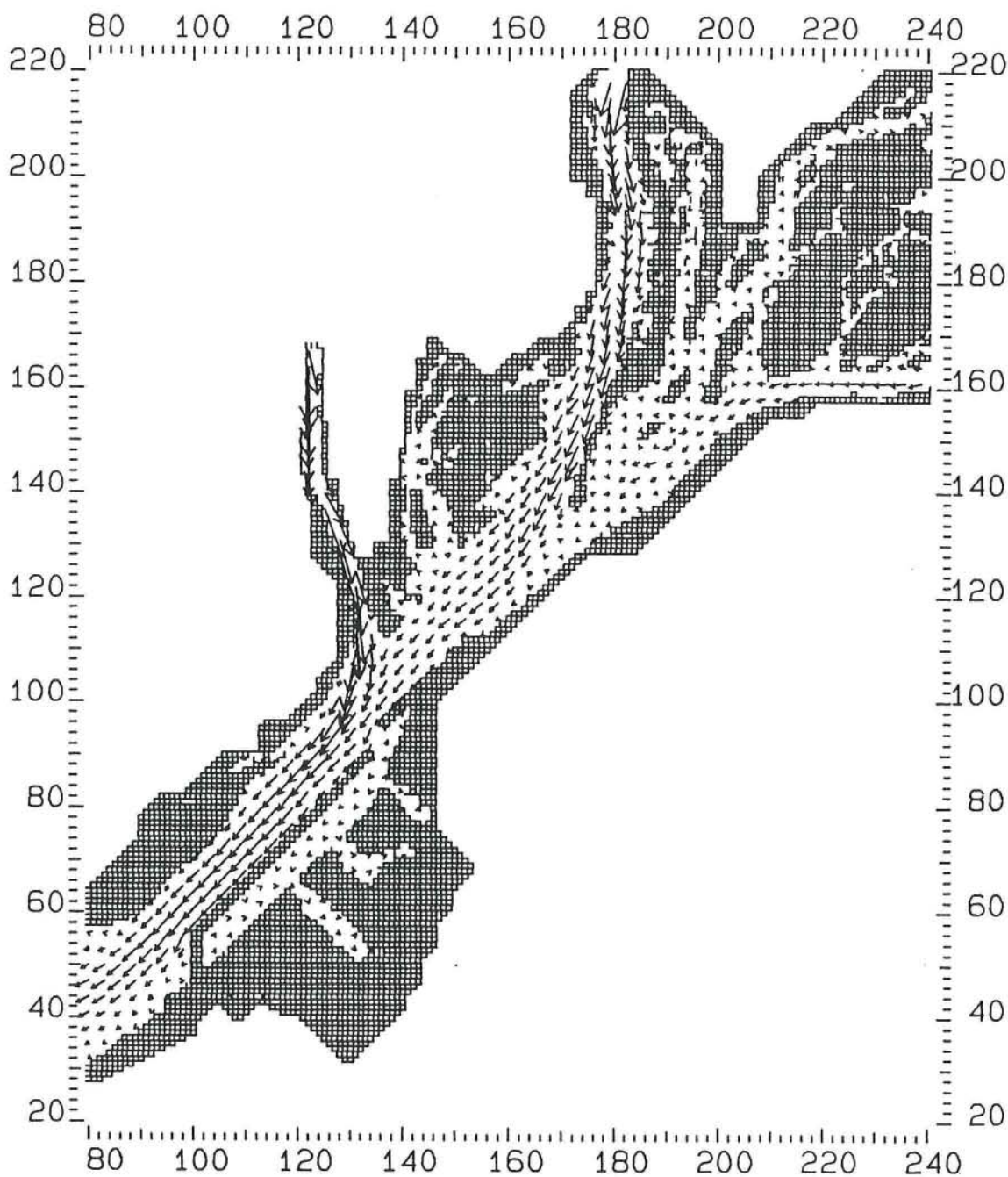


Figuur 2 Tijdens eb

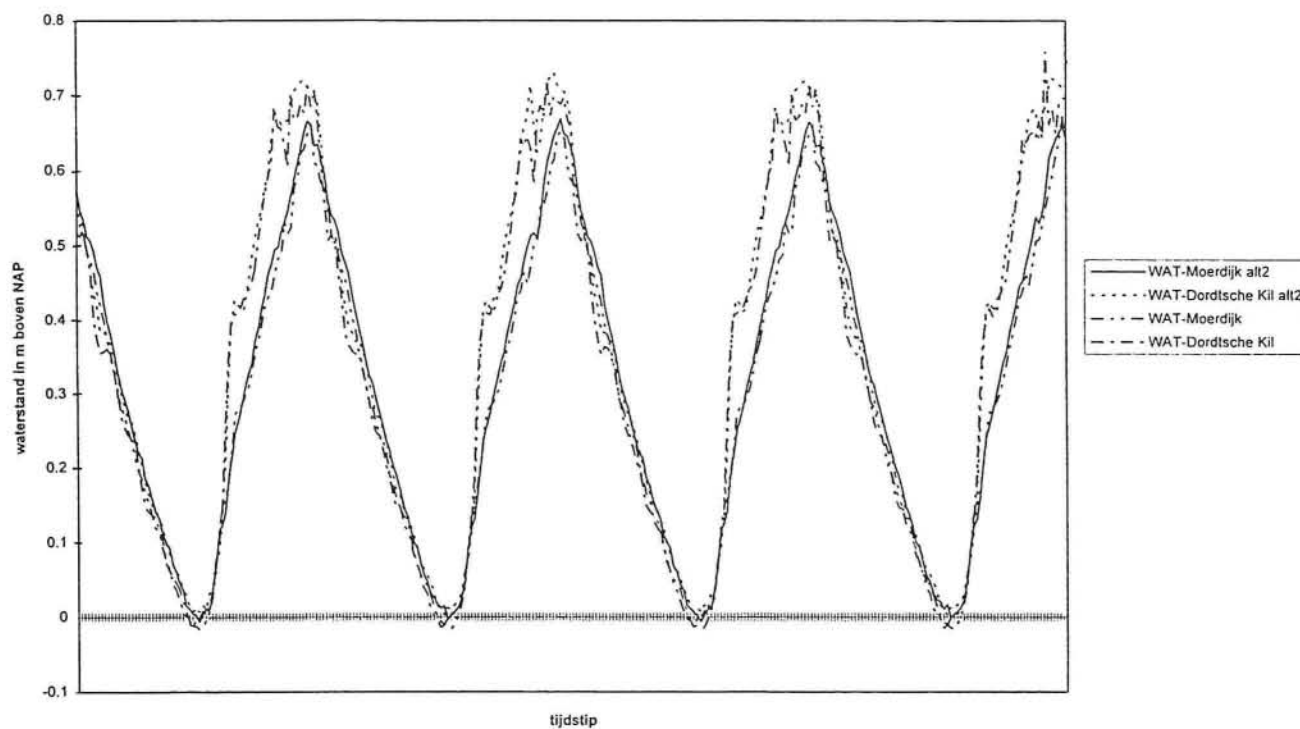
VII.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting, bij Rijnafvoer 5000m³/s, fig 3

Figuur 3 Tussen eb en vloed/ vloedstroom

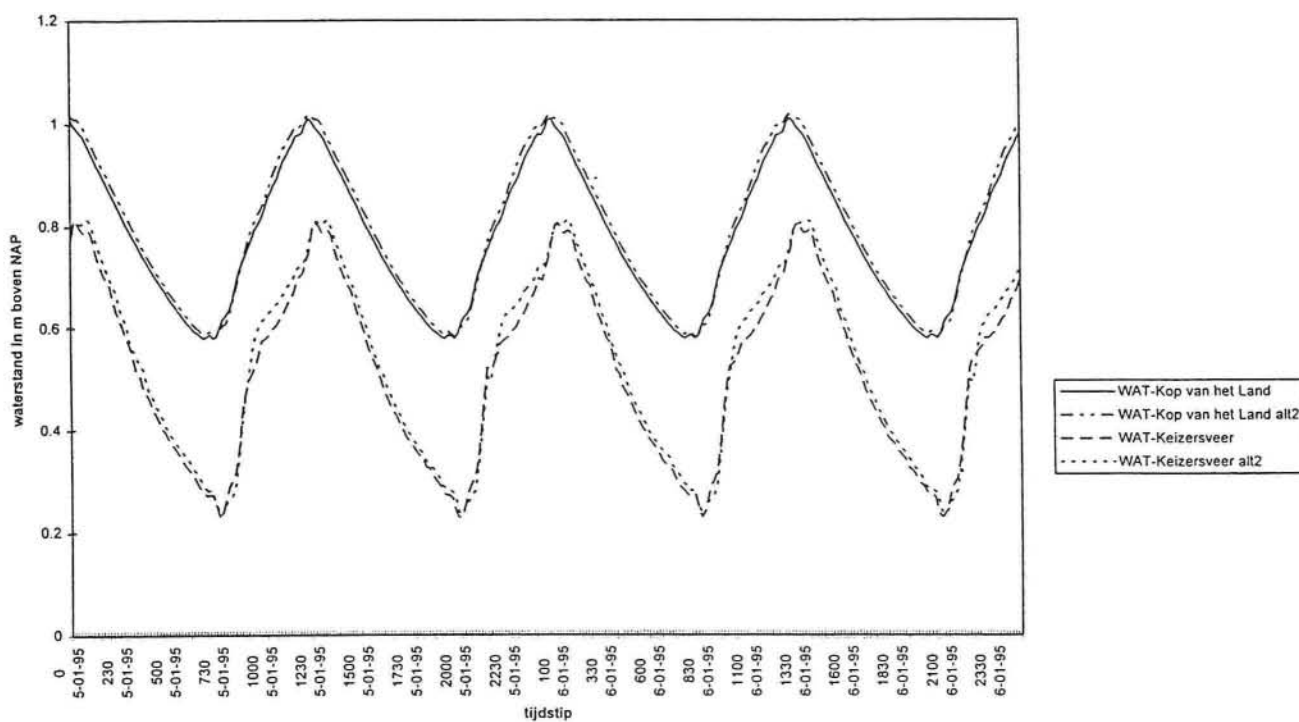
VII.4.1 Stroombeeld alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting, bij Rijnafvoer 5000m³/s, fig 4



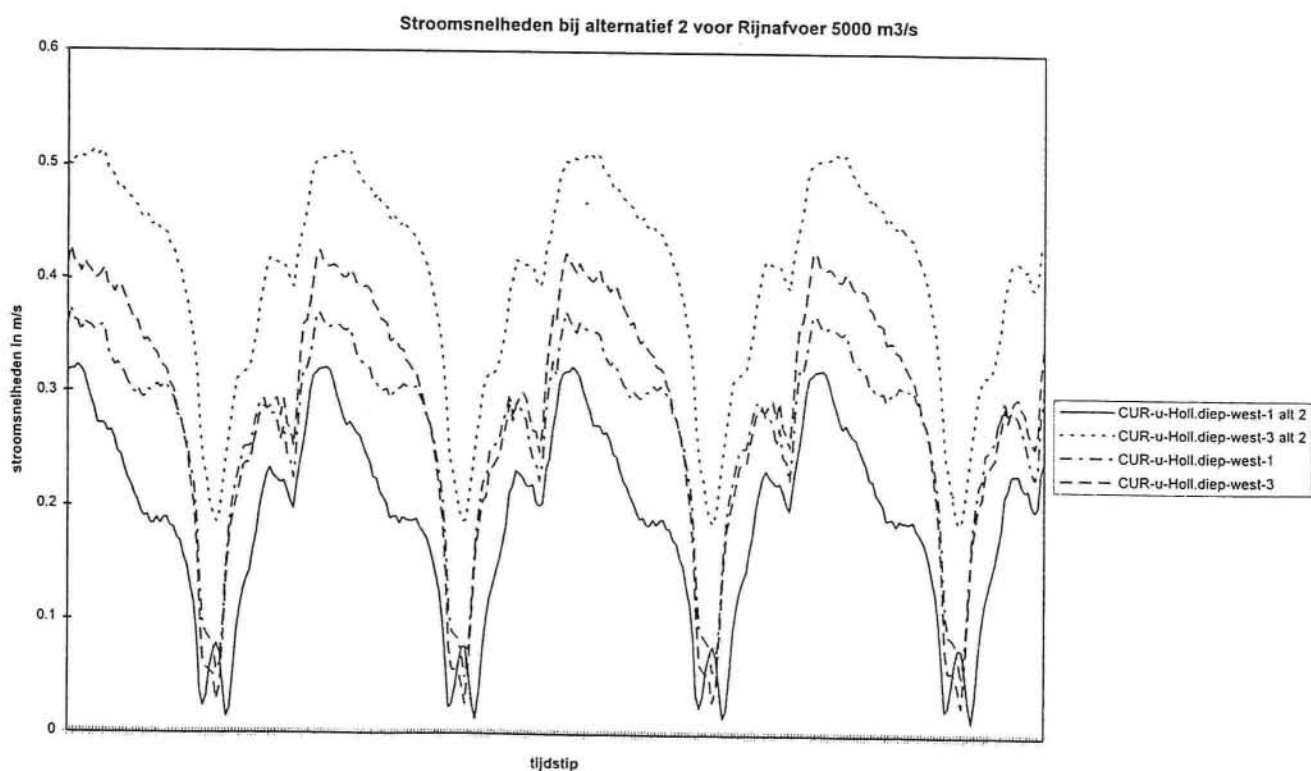
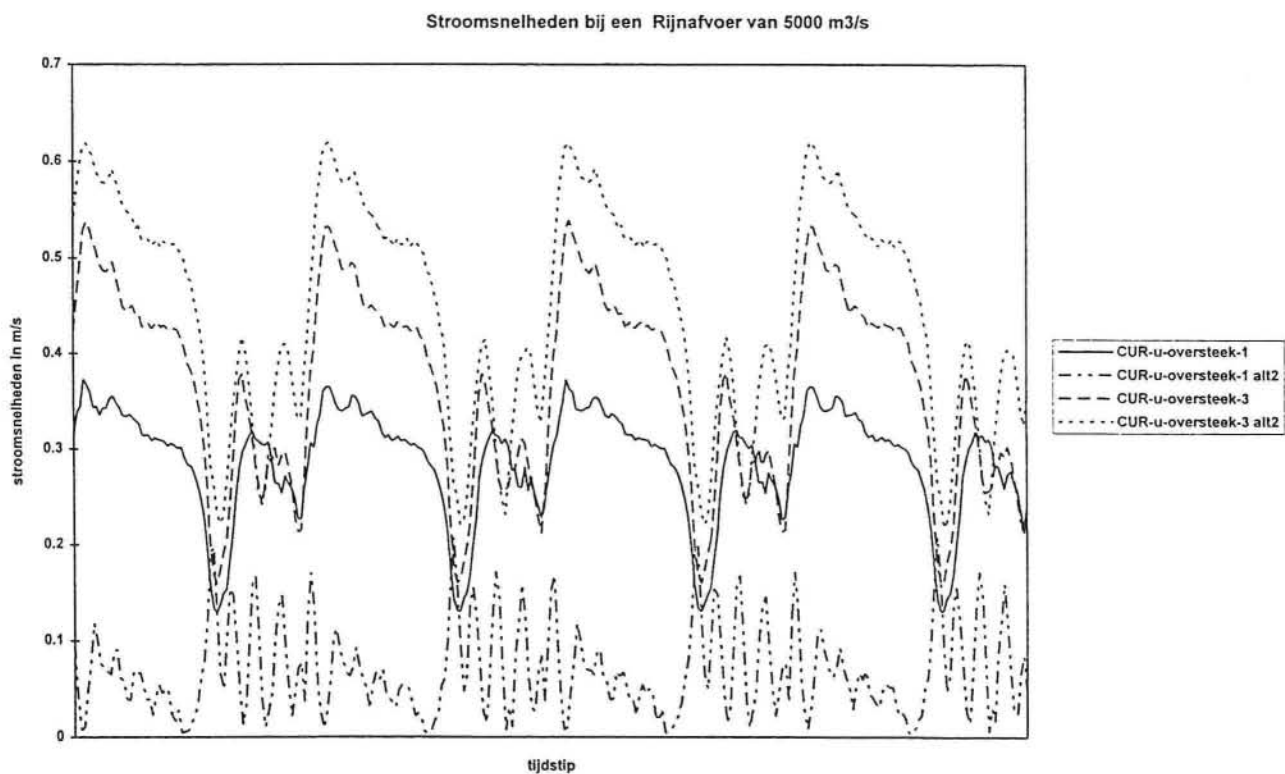
Figuur 4 Tijdens vloed

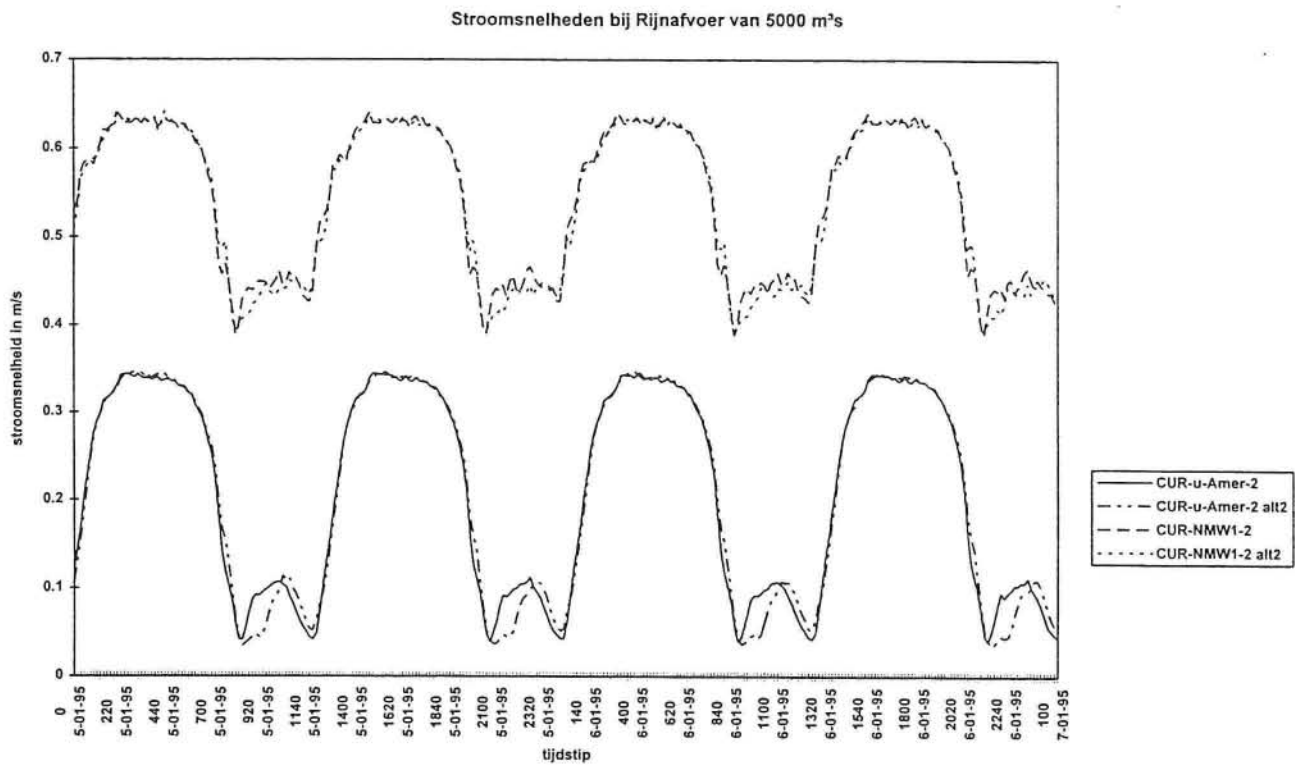
VII.4.2 Waterbeweging alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting bij Rijnafov. 5000 m³/sWaterstanden bij alternatief 2 en Rijnafoer van 5000 m³/s

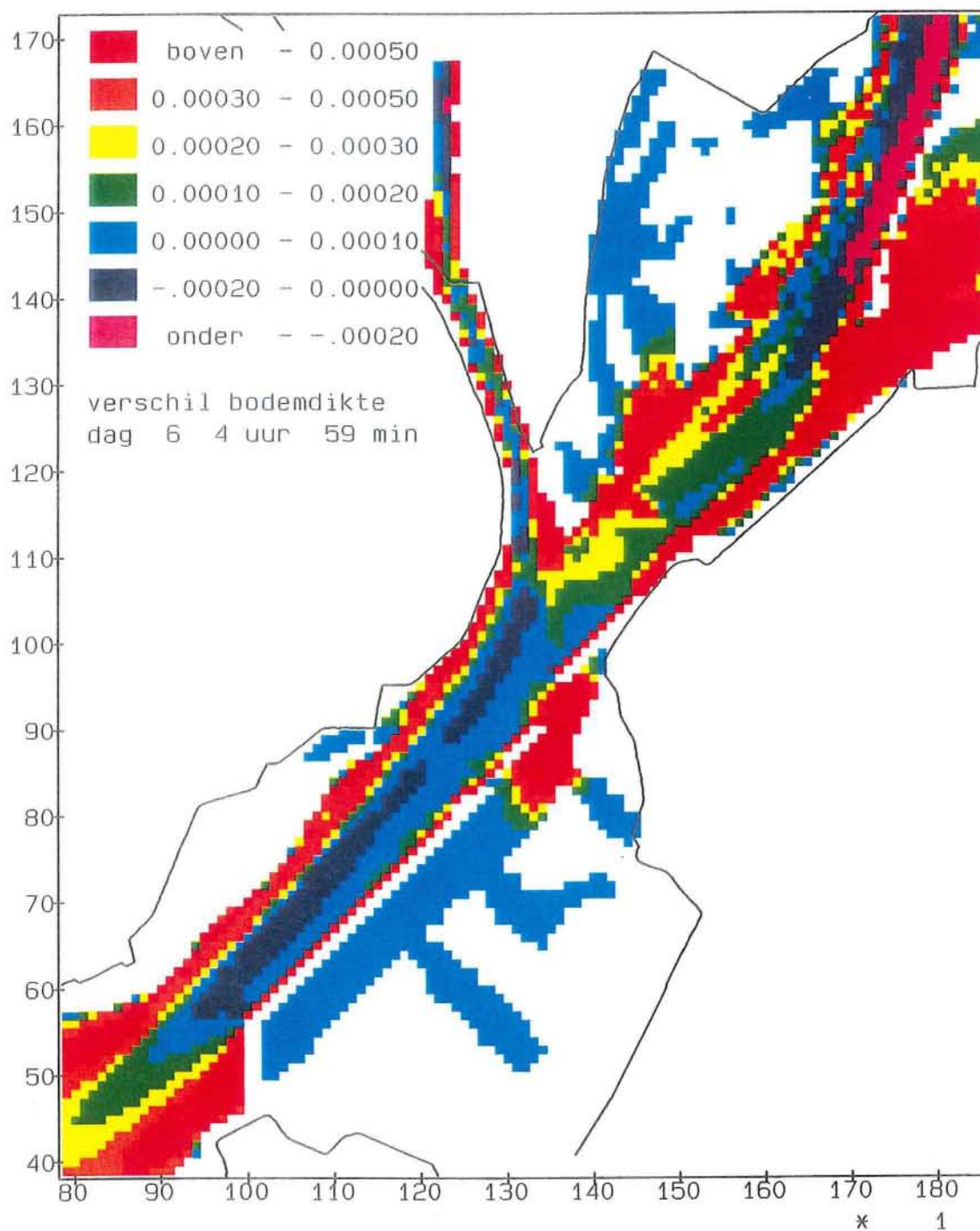
waterstanden bij alternatief 2 en Rijnafoer 5000



VII.4.2 Waterbeweging alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Rijnafv. 5000 m³/s, vervolg



VII.4.2 Waterbeweging alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting Rijnafv. 5000 m³/s, vervolg

VII.4.3 Sedimentatie alternatief 2: Gedeeltelijke afsluiting bij Rijnafvoer 5000 m³/s

Met dank aan:

TU Delft

K.d'Angremond
C.Kranenburg
T. van der Meulen
F.van Roode
G-J. Schiereck
G. Stelling

RWS dir. Zuid-Holland

afd. APS

J. Al
A. Broekhuizen
H.van Bommel
M. Bubbert
C. Coster
A. Dekker
P.van Dreumel
M. Goosens
J.van Hees
J. Luijendijk
H.van der Meulen
J. Mol
J.de Neef
R. Nolten
M. Ohm
H. Ooms
P. Riedeman
L.van Sintmaartensdijk
A.van Schaick
A.van Spijk
P. Veelo
e.a.

H.de Bruijne
J.van Dijke
C.de Froe
D. Hage
M.van Zetten
e.a.

RIZA-Dordrecht

R. Bol
M. Sileon
H. Verbeek
J.van Zetten

en verder nog:

E. Collard (Svasek)
H.van Dijke (IHM)
L.Jansen-Dorbeck
W.van Leussen (RIKZ)
G. Rodewijk(IHM)
en vele anderen

